

# 车轮轮箍

CHELUN LUNGU CHAOSHENGBO  
TANSHANG QUEXIAN TUPU

张明如 陈昌华  
钱健清 肖 峰 等编著

# 超声波

探伤缺陷图谱



合肥工业大学出版社  
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

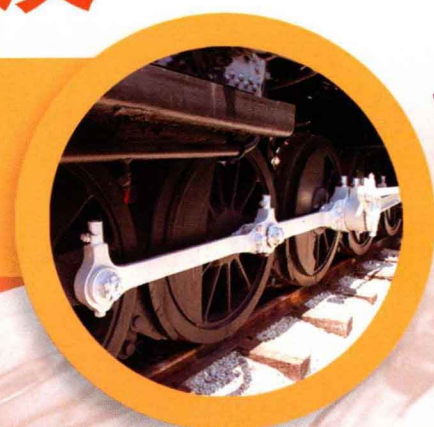
# 车轮 轮箍

CHELUN LUNGU  
CHAOSHENGBO TANSHANG QUEXIAN, TUPU

## 超声波

### 探伤缺陷图谱

张明如 陈昌华  
钱健清 肖 峰 等编著



常州大学图书馆  
藏书章

合肥工业大学出版社

## 内 容 简 介

本书是作者结合多年生产实际和科研成果编写而成,主要包括车轮轮箍质量检验的物理基础,车轮轮箍缺陷的宏观检验、金相检验、电子扫描检验、超声波检验及其各自图谱,并列举了大量车轮轮箍缺陷分析实例。本书的最大特色是采用宏观、微观和超声波成像三种检验方式把生产过程中遇到的一些典型缺陷的形貌进行对比展示,并分别进行描述与分析,其中重点对车轮轮箍超声波探伤缺陷图谱进行研究,这是超声波探伤技术的创新。

本书不仅对车轮轮箍生产企业有较大的使用价值,对于车辆制造、使用和检修企业也有同样的价值,还可以供大型锻件生产或使用企业及有关科研部门和高等学校参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

车轮轮箍超声波探伤缺陷图谱/张明如等编著. —合肥:合肥工业大学出版社,2012.5  
ISBN 978-7-5650-0695-1

I. ①车… II. ①张… III. ①机车—轮箍—超声检验—图谱 IV. ①U260.331-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 059143 号

## 车轮轮箍超声波探伤缺陷图谱

张明如 陈昌华 钱健清 肖 峰 等 编著

责任编辑 汤礼广

出 版 合肥工业大学出版社  
地 址 合肥市屯溪路 193 号  
邮 编 230009  
电 话 理工编辑部:0551—2903087  
市场营销部:0551—2903198  
网 址 www.hfutpress.com.cn  
E-mail hfutpress@163.com

版 次 2012 年 5 月第 1 版  
印 次 2012 年 10 月第 1 次印刷  
开 本 889 毫米×1194 毫米 1/16  
印 张 17.5  
字 数 397 千字  
印 刷 安徽联众印刷有限公司  
发 行 全国新华书店

ISBN 978-7-5650-0695-1

定价:198.00 元(附光盘)

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

## 编写委员会

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 主 编 | 张明如 |     |     |     |
| 副主编 | 陈昌华 | 钱健清 | 肖 峰 |     |
| 成 员 | 汤志贵 | 杨丽珠 | 赵志海 | 蒲 红 |
|     | 陈能进 | 祝宝芹 | 邹 强 | 任 萍 |
|     | 穆惠青 | 陈志宏 | 王 翔 | 童克斌 |
|     | 秦郁雯 | 陈 刚 | 赵志海 | 杨永安 |
|     | 俞卫权 | 左奇丽 | 刘盛杰 |     |

## 审定委员会

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 主 任 | 张建平 |     |     |     |
| 副主任 | 崔银会 | 安 涛 | 李 翔 |     |
| 成 员 | 江 波 | 黄亚强 | 卜宜文 | 王 越 |
|     | 李月兰 | 李胜祇 |     |     |

列车向高速重载方向的不断发展，促使我国的车轮制造技术也随之不断完善和不断更新。铁道部早在 21 世纪的第一个五年计划中就明确要求：继续加快铁路建设，重点建设在中国交通运输中起骨干作用的“八纵八横”铁路主通道，建成以北京、上海、广州为中心的三个提速圈，省会城市之间要实现“朝发夕至”、“夕发朝至”的目标。铁路交通提速已成为我国铁路发展的新战略。铁路建设的发展关键之一是车轮制造技术的进步。

车轮作为列车的重要构件之一，其质量的优劣直接关系到列车的安全性。检测人员在列车检修过程中，经常发现车轮轮辋裂纹、踏面剥离和踏面局部凹下等问题，其原因大多数是车轮轮箍内部存在着缺陷造成的。车轮在运行的过程中，缺陷不断地扩展，会对列车的安全行驶造成极大的影响。为确保车轮的质量，必须采用不破坏产品原来的形状、不改变其使用性能的检测方法，对车轮进行准确检测。这种技术其实就是无损检测，其水平的高低是一个国家工业是否发达以及发达程度如何的重要标志之一。超声波检测技术作为应用最为广泛的无损检测技术，已经有几十年的历史了。近年来，伴随着微电子技术、计算机技术、数字技术、传感技术、自动控制技术的发展，现代超声无损检测技术几乎渗透到所有的检测领域，车轮质量检测领域也毫不例外。

马鞍山钢铁公司作为中国列车车轮重要生产基地，其生产的车轮很早就以中国名牌产品的身份进入了欧美市场。如今，马鞍山钢铁公司正在极力打造中国高速列车车轮，以期再上新的台阶，力争成为全球最大的车轮生产基地。这就要求其车轮轮箍的超声波检测能力要达到更高的水平。

当今世界上的超声波检测有两大形式，即波形检测和图形检测。国际上虽然出版过许多版本的超声波检测典型缺陷图谱书籍，但是专门针对列车车轮的超声波检测典型缺陷图谱的书籍却不多见。正是基于超声波技术的发展以及企业对车轮质量要求不断提高的背景，马鞍山钢铁公司的张明如、陈昌华等同志结合自己的生产实践经验和实验研究成果，与安徽工业大学有关专家共同编写了这本《车轮轮箍超声波探伤缺陷图谱》。这些同志长期在生产一线从事车轮轮箍检测和实验工作，收集和整理了大量的车轮轮箍典型缺陷图谱，并与采用低倍、金相以及扫描电子显微镜等手段获得的常规检验图谱进行对比校验，这种对比手段在车轮轮箍检测上不仅是一次探索，更是一个创新。尤其是安徽工业大学的加入，让本书在介绍车轮轮箍缺陷检测技术的同时又显示出车轮轮箍缺陷检测研究的科研价值。相信本书对车轮轮箍检测人员及相关工程技术人员的工作会有很大的帮助。

我很高兴地推荐这本《车轮轮箍超声波探伤缺陷图谱》，愿它能为车轮轮箍检验人员添上更加有力的检测翅膀。

马鞍山钢铁股份有限公司技术中心

常务主任 张建平

# QIANYAN

## 前言

在科学技术飞速发展的今天，铁路运输业已经成为世界上很多国家经济发展的重要基础。改革开放以来，我国也逐渐建立了自己的铁路快速运输系统，铁路已成为我国经济发展的重要命脉。车轮作为铁路运输工具——列车的关键部件之一，其质量高低直接关系到铁路运输业的快速发展。然而在实际生产过程中，由于各种原因，车轮轮箍会出现各种各样的缺陷，这些缺陷对车轮轮箍的性能和寿命有着直接的影响，因此，车轮轮箍的检验工作在车轮轮箍的生产中显得极其重要。

科学技术的发展促使车轮轮箍检测手段不断进步，这就要求车轮轮箍检验工作者不断地学习新的科学知识，熟悉检验标准，了解和掌握先进的检验方法和检验手段。现在马鞍山钢铁公司提出并采用一种新的检测手段——车轮轮箍超声波预测检验，不仅能减少随机检验的风险以及减轻检验人员的劳动强度，而且其检验准确、可靠。为了总结经验，进一步提高车轮轮箍的检验水平，马鞍山钢铁公司结合自身生产实际与安徽工业大学合作编写本书。全书共分七章，主要内容有：超声波检测的物理基础、车轮轮箍的生产工艺与质量检验、车轮轮箍缺陷的宏观检验及其图谱、车轮轮箍缺陷的金相检验及其图谱、车轮轮箍缺陷的电子扫描检验及其图谱、车轮轮箍缺陷的超声波检测及其图谱、车轮轮箍缺陷分析实例等。本书的最大特色是采用宏观、微观和超声波成像三种检验方式把生产过程中遇到的一些典型缺陷的形貌进行对比展示，并分别进行描述与分析，其中重点对车轮轮箍超声波探伤缺陷图谱进行研究，这是超声波探伤技术的创新。在实际生产中若根据探伤结果提出改进措施，肯定会进一步提高车轮轮箍质量，从而必然会产生巨大的经济效益和社会效益。

本书第一章由汤志贵、秦郁雯编写，第二章由肖峰、穆惠青、陈志宏编写，第三章由赵志海编写，第四章由杨丽珠编写，第五章由蒲红编写，第六章由陈昌华、邹强编写，第七章由钱健清、张明如、任萍编写。本书附录一由祝宝芹整理校对，附录二、附录七由陈能进整理校对，附录三由陈昌华、邹强整理校对，附录四由陈昌华、陈能进整理校对，附录五由赵志海、陈昌华整理校对，附录六由杨丽珠、邹强整理校对，全书由陈昌华同志统稿。参与整理及校对工作的其他同志有陈刚、赵海、王翔、童克斌、杨永安、俞卫权、左奇丽、刘盛杰。全书由张明如同志担任主编，陈昌华、钱健清、肖峰同志担任副主编，其中陈昌华同志还负责承担本书编写的技术指导工作及编校人员的协调工作。

本书初稿完成后，马鞍山钢铁公司的张建平、崔银会、安涛、李翔、江波、黄亚强、卜宜文、王越、李月兰以及安徽工业大学的李胜祗教授共同对本书进行了审阅，感谢以上专家提出的中肯和宝贵的意见。在编撰本书的过程中，我们还参考和引用了一些著作文献中的内容，在此谨向这些著作文献的作者表示谢意。

本书不仅对车轮轮箍生产企业有较大的使用价值，对于车辆制造、使用和检修企业也有同样的价值，还可以供大型锻件生产或使用企业及有关科研部门和高等学校参考。

由于我们编写的经验和水平有限，加之时间仓促，错误和不妥之处在所难免，欢迎有关专家、同仁和广大读者批评指正。

编者

# MULU

## 目 录

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| 第一章 超声波检测的物理基础 .....          | (1)  |
| 1.1 振动与波 .....                | (1)  |
| 1.2 超声波的传播 .....              | (4)  |
| 1.3 超声平面波在大平界面上垂直入射的行为 .....  | (14) |
| 1.4 超声平面波在平面上斜入射的行为 .....     | (21) |
| 1.5 聚焦与发散 .....               | (23) |
| 1.6 超声波的获得与超声场 .....          | (26) |
| 1.7 超声波的绕射、散射和对规则反射体的反射 ..... | (29) |
| 1.8 超声波的衰减 .....              | (36) |
| 第二章 火车车轮轮箍的结构与生产工艺 .....      | (40) |
| 2.1 火车车轮轮箍的结构与分类 .....        | (40) |
| 2.2 火车辗轧车轮轮箍的制造技术概述 .....     | (40) |
| 2.3 火车车轮轮箍质量检验 .....          | (41) |
| 2.4 主要缺陷形成的机理和对策 .....        | (42) |
| 第三章 车轮轮箍缺陷的宏观检验及其图谱 .....     | (52) |
| 3.1 酸浸试验及其缺陷图谱 .....          | (52) |
| 3.2 断口检验及缺陷图谱 .....           | (59) |
| 第四章 车轮轮箍缺陷的金相检验及其图谱 .....     | (63) |
| 4.1 金相试样选择与截取 .....           | (63) |
| 4.2 金相试样制备 .....              | (63) |
| 4.3 显微组织检验的方法 .....           | (65) |
| 4.4 车轮轮箍的金相检验与图谱分析 .....      | (66) |
| 第五章 车轮轮箍缺陷的电子扫描检验及其图谱 .....   | (77) |
| 5.1 扫描电子显微镜 .....             | (77) |
| 5.2 能谱仪 .....                 | (79) |
| 5.3 扫描电镜试样的制备 .....           | (80) |
| 5.4 电镜扫描检验图谱与分析 .....         | (80) |

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| 第六章 车轮轮箍缺陷的超声波检测及其图谱 .....         | (93)  |
| 6.1 超声波检测仪 .....                   | (95)  |
| 6.2 车轮轮箍的超声波检测 .....               | (105) |
| 6.3 数字超声波检测扫描技术 .....              | (108) |
| 6.4 车轮轮箍超声波检测缺陷图谱与对应分析 .....       | (114) |
| 第七章 车轮轮箍缺陷分析实例 .....               | (139) |
| 7.1 车轮轮箍探伤缺陷分类与判断 .....            | (139) |
| 7.2 CL-1 车轮探伤缺陷分析 .....            | (147) |
| 7.3 CL-2 车轮探伤缺陷分析 .....            | (150) |
| 7.4 CL-3 客车车轮缺陷分析 .....            | (154) |
| 7.5 CL-4 轮箍、CL-5 环件缺陷分析 .....      | (158) |
| 7.6 CL-6 车轮探伤缺陷分析 .....            | (160) |
| 7.7 CL-7 环件探伤缺陷分析 .....            | (165) |
| 7.8 CL-8 地铁轮缺陷分析 .....             | (167) |
| 7.9 CL-9 车轮探伤缺陷分析 .....            | (171) |
| 7.10 CL-10 车轮探伤缺陷分析 .....          | (173) |
| 7.11 CL-11 环件、CL-12 车轮探伤缺陷分析 ..... | (178) |
| 7.12 CL-13 车轮探伤缺陷分析 .....          | (183) |
| 7.13 CL-14 地铁车轮探伤缺陷分析 .....        | (186) |
| 7.14 CL-15 镟裂车轮探伤分析 .....          | (188) |
| 7.15 CL-16 车轮探伤缺陷分析 .....          | (192) |
| 附录一 车轮轮箍超声波探伤缺陷典型位置图 .....         | (200) |
| 附录二 车轮轮箍超声波探伤缺陷 A 型特征图 .....       | (208) |
| 附录三 车轮轮箍超声波探伤缺陷 C 型特征图 .....       | (218) |
| 附录四 车轮轮箍超声波探伤缺陷 S 型特征图 .....       | (225) |
| 附录五 车轮轮箍超声波探伤低倍解剖图谱 .....          | (237) |
| 附录六 车轮轮箍超声波探伤金相图谱 .....            | (245) |
| 附录七 车轮轮箍超声波探伤对应解剖图谱 .....          | (251) |
| 参考文献 .....                         | (265) |

# 第一章 超声波检测的物理基础

随着科学技术的飞速发展，加上车轮轮箍的使用范围不断扩大，人们对车轮轮箍的质量及其检测技术提出了更高的要求。目前对车轮轮箍检测分析的手段虽然有低倍检验、金相检验、电子扫描检验等，但均存在着一定的随机性以及试样磨面是否存在缺陷的不确定性等因素，因此，这些分析手段对车轮轮箍缺陷大多存在着漏检的可能性。于是，人们又提出采用超声波对车轮轮箍进行检测分析。采用超声波检测不仅可以减少随机检验带来的风险及减轻人们检测的劳动强度，而且检验准确、可靠。

在详细介绍超声波检测分析的技术之前，下面先介绍一下超声波检测的理论基础，以便让读者更清晰和更全面地了解超声波这门检测技术。

## 1.1 振动与波

### 1.1.1 机械振动

在物理学术语中，振动的定义是：一个物理量的值在观测时间内不停地在极大值和极小值之间变化，这种变化状态称为振动。如果振动量是一个力学量，如位移、角位移等，所做的振动则称之为机械振动。为此我们定义：物体沿着直线或曲线在某一平衡位置附近做往复周期性的运动称为机械振动。如图 1-1 所示，往下拉一下安装在弹簧一端的小质点，松开后而产生的运动就是机械振动，简称振动。

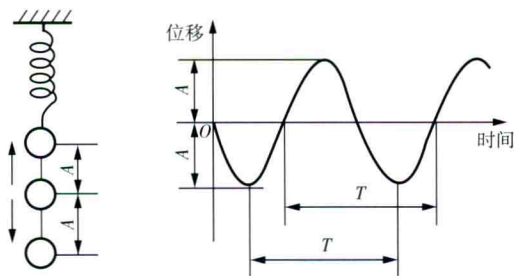


图 1-1 加载弹簧的振动

在摩擦力可忽略的情况下，上述振动都是正弦函数或余弦函数性质的运动，这也是振动中最基本、最重要的一种运动——简谐振动，它是物体或质点在弹性力或准弹性力作用下发生的运动。其特点是：物体受到的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。简谐振动物体的振幅不变，为自由振动，其频率为固有频率。

物体做简谐振动时，只有弹性力或重力做功，其他力不做功，这符合机械能守恒的条件。因此，简谐振动的能量遵守机械能守恒定律，即在平衡位置时动能最大，势能为零；在位移最大时，势能最大，动能为零，其总能量保持不变。

振动的类型很多，除了简谐振动外，还有固有振动、受迫振动、阻尼振动等，这些振动虽然都属于较为复杂的振动，但是它们的基础是简谐振动。

阻尼振动是振幅或能量随时间不断减小的振动。由于克服阻力做功，振动物体在传播过程中，伴随着能量的传递，阻尼振动的振幅不断减小。阻尼振动受到阻力的作用，因此不符合机械能守恒。

受迫振动是物体受到周期变化的外力作用时产生的振动。如缝纫机上缝纫针的振动，气缸中活塞的振动和扬声器中纸盆的振动等。受迫振动刚开始时情况很复杂，经过一段时间后达到稳定状态，变为周期性谐振动。其振动频率和策动力频率相同，振幅保持不变。

受迫振动的振幅和策动力的频率有关，当策动力频率  $p$  与受迫振动物体固有频率相同时，受迫振动的振幅达到最大，这种现象称为共振。受迫振动物体受到策动力的作用，不符合机械能守恒。

超声波探头中的压电晶片在发射超声波时，一方面受高频电脉冲激励，另一方面在起振后受到晶片背面吸收块的阻尼作用，因此又是阻尼振动。压电晶片在接收超声波时同样产生受迫振动和阻尼振动。在设计探头中的压电晶片时，应使高频电脉冲的频率等于压电晶片的固有频率，从而产生共振，这时压电晶片的电声能量转换效率最高。

振动是往复和周期性的运动，振动的快慢常用振动周期和振动频率两个物理量来描述：一种振动当其振动量每隔一固定的时间  $T$  就完全重复一次，这个固定时间称为振动周期，用  $T$  表示，常用单位为秒（s）；而每秒钟所完成的周期数即称为振动频率，用  $f$  表示，常用单位为赫兹（Hz）。由振动周期和振动频率的定义可知，它们两者互为倒数，即  $T=1/f$ 。

### 1.1.2 机械波动

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。

机械振动在弹性介质中的传播过程称为机械波，例如水波、声波与超声波等。

通常认为物体是由以弹性力保持平衡的各个质点所构成的。这种弹性介质的简化模型如图 1-2 所示。当某一质点受到外力的作用后，该质点就在其平衡位置附近振动。由于一切质点都是彼此联系的，振动质点的能量就能够传递给周围的质点而引起周围质点的振动。这样在弹性介质中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，

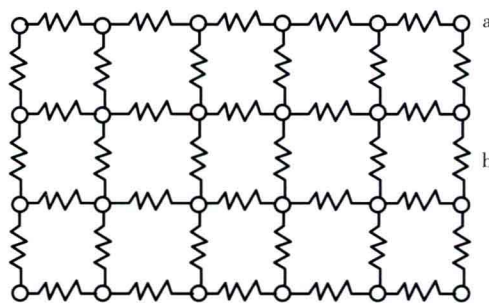


图 1-2 弹性介质模型  
a—质点 b—弹性力

从而形成机械波。

由此可见，产生机械波必须具备以下两个条件：

- ① 有机械振动的波源；
- ② 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。

机械波的传播仅是振动状态和振动能量的传输，也就是说振动质点仅将振动能量传递给相邻质点，质点只在各自平衡位置附近来回振动，振动的质点并不随波而移走，只是在自己的平衡位置附近振动而已。

除了上述的机械波外，还有一类波动是电磁波，其产生是由于电磁振荡所产生的变化电场和变化磁场在物体中或空间的传播过程，例如无线电波、红外线、可见光、紫外线、伦琴射线等均属电磁波范畴。它与机械波一样具有波动的一些共同特性，例如，它们都是由于振源通过物质之间的相互影响而形成的，其传播有一定速度，并伴随有能量的传递，在不均匀的介质中都会产生反射、折射和绕射现象。

当然，机械波与电磁波在本质上的差异还是很大的。例如，机械波的传播过程必须依赖于传播的介质，而电磁波的传播可以不依赖传播介质，即使在真空中也能传播与输送。

### 1.1.3 超声波

人们日常所听到的各种声音，是由于各种声源的振动通过空气等弹性介质传播到耳膜，引起的耳膜振动，牵动听觉神经，从而产生听觉。但并不是任何频率的机械振动都能引起听觉，只有当频率在一定的范围内的振动才能引起听觉。

如果以频率  $f$  来表征声波，并以人的可感觉频率作为分界线，则可把声波划分为次声波 ( $f < 20\text{Hz}$ )、声波 ( $20\text{Hz} \leq f \leq 20\text{kHz}$ ) 及超声波 ( $f > 20\text{kHz}$ )，其中只有声波可闻。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。超声波是声波大家族中的一员，和可闻声波本质上是一致的，它们的共同点都是一种机械振动，通常以纵波的方式在弹性介质内传播，是一种能量的传播形式；它们的不同点主要在于频率不同，超声波频率高，波长短，在一定距离内沿直线传播，具有良好的束射性和方向性。在超声波检测中，最常用的频率范围为  $0.25\text{MHz} \sim 15\text{MHz}$ ，金属材料超声波检测常用的频率为  $0.5\text{MHz} \sim 10\text{MHz}$ 。安徽工业大学材料科学与工程学院实验室超声波检测仪的频率可达到  $20\text{MHz} \sim 25\text{MHz}$ 。这种高频率主要用于精细材料和高灵敏度检测，属于超声显微检测技术，检测分辨率极高。

由于超声波频率比可闻声波高得多，因此，其波长短，加上它在固体中传播时传递能量较大，这样，使得它传播时具有与光波类似的某些特性。为此，人们也常常借用光学原理来研究和解释超声波的物理现象。超声波具有以下几个特性：

① 束射特性。由于超声波的频率高，其波长较在同样介质中的声波波长短得多，衍射现象不明显，所以超声波的传播方向好。超声波波长短，声束指向性好，可以使超声波能量向一定方向集中辐射。

② 反射特性。超声波在弹性介质中传播时，遇到异常界面会产生反射、透射或折射，而反射特性正是脉冲反射法检测的理论基础。

③ 传播特性。超声波在弹性介质中传播时，质点振动位移小，振速高，因此，其声压、声强均比可闻声波大，传播距离远，可检测范围大。

④ 波形转换特性。超声波在两个声速不同的异质界面上容易实现波形转换，从而为各种波形（纵波、横波、板波、表面波）检测提供了方便。

人们正是利用了超声波的这些特性，才使超声波检测技术不断得以发展。超声波在工农业生产中有极其广泛的应用。在工业中，超声波可用来对材料进行检测和探伤，可以测量气体、液体和固体的物理参数，可以测量厚度、液面高度、流量、粘度和硬度等，还可以对材料的焊缝、粘接等进行检查。超声波清洗和加工处理技术可以应用于切割、焊接、喷雾、乳化、电镀等工艺过程中。其中超声波清洗是一种高效率的清洗方法，已经用于尖端和精密工业。大功率超声波还可用于机械加工，例如拉管、拉丝、挤压和铆接等工艺。应用在医学中的超声波诊断技术发展很快，它与 X 射线诊断方法、同位素诊断方法一起被称为医学上的三大影像诊断方法，例如超声波理疗、超声波诊断、肿瘤治疗和结石粉碎等。在农业中，可以用超声波对有机体细胞的杀伤特性来进行消毒灭菌，对作物种子进行超声波处理，有利于种子发芽和农作物增产。此外超声波的液体处理和净化技术可应用于环境保护中，例如超声波水处理、燃油乳化、大气除尘等。微波超声的发展重点现在主要是放在研制微波电子器件上，已经制成了超声波延迟线、声电放大器、声电滤波器、脉冲压缩滤波器等。

## 1.2 超声波的传播

### 1.2.1 波阵面与波形

声波在无限大且各向同性的介质中传播时，有其波形。波形即波的形状，是波动过程中某一瞬时振动相位相同的所有质点连成的面——波阵面。按其波形，声波可分为球面波、平面波、活塞波和柱面波。其中，某一时刻振动传到距声源最远的各质点所连成的波阵面称为波前；表示波传播方向的线称为波线。

在各向同性介质中波线恒垂直于波阵面，在任何时刻波前的位置总是确定的，且只能有一个，而波阵面的数目可以是任意多个。

设声源的形状为平面、球体和圆柱，则所发出的波的波阵面形状可为平面、球面和柱面。此外，当声源形状为圆盘时可发出活塞波。

#### (1) 球面波

波阵面为同心面的波称为球面波。球面波的声强与距声源距离的平方成反比，故声压与距离成反比。图 1-3 为球面波的声强与距离的关系。如距离用  $a$

表示，则可得  $\frac{p_0}{p_1} = \frac{a_1}{a_0}$ 。

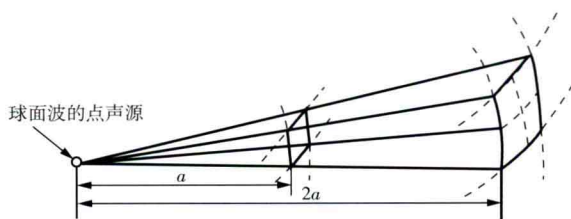


图 1-3 球面波的声强与距离的关系

在超声检测中，特别是检测大试件时，球面波是最常见的波。这是因为由一般超声波振动所发出的波在很远的距离处可看成是球面波。

### (2) 平面波

波阵面为平面的波称为平面波。平面波的波源为一个平面。一个作简谐振动的无限大平面在各向同性的弹性介质中传播的波是平面波。如不考虑介质吸收波的能量，则声压随声源的距离变化而变化，即声压是个恒量。理想的平面波是不存在的，但如果声源平面的长、宽尺寸较所产生的声波波长大多时，该声源发射的声波可近似地看作是平面波。若不考虑材质的衰减，平面波声压不随声源距离的变化而变化。平面波的波动方程为：

$$Y = A \cos(\omega t - x/c)$$

式中：A——振幅；

$\omega$ ——角频率；

$t$ ——某一时刻；

$x$ ——距声源的距离；

$c$ ——传播速度。

### (3) 活塞波

在超声波检测的实际应用中，声源尺寸既不能看成很大，也不能看成很小，它所发出的超声波介于球面波与平面波之间，称之为活塞波。当传播距离远远大于声源的尺寸，则可将一定几何尺寸的片状声源视为点声源，传至相当远处的波形可认为是球面波。

### (4) 柱面波

波阵面是同轴圆柱面的波称为柱面波。其声源是一无限长的线状直柱，柱面波的声强与距声源的距离成反比，故声压与距离的平方根成反比。

## 1.2.2 连续波与脉冲波

声波在介质中传播的振幅变化一般采用正弦波（或余弦波）的波动规律来描述。波动随时间传播的方式主要有两种：一种叫连续波，另一种叫脉冲波。波源持续不断地振动所辐射的波称为连续波，如图 1-4a 所示，其中最典型的是各质点都作同频率的简谐振动，这种情况下的连续波称为简谐波（也称正弦波、余弦波）；波源振动持续时间很短，间隙辐射的波称为脉冲波，如图 1-4b 所示。

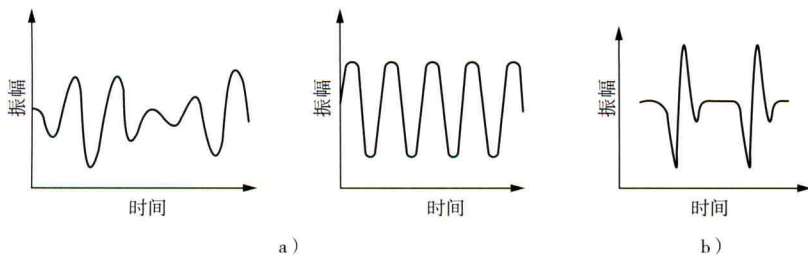


图 1-4 连续波与脉冲波

a) 连续波 b) 脉冲波

连续波和脉冲波在传播过程中的理论分析是完全不同的。例如，两者在异质界面上的干涉情况、反射和透射规律、板状介质中的声速传播以及各自的声场特性等都有不同。但在实际超声波检测中，由于频率对反射和折射的影响不大，因而，用连续波的规律处理脉冲波应用中遇到的问题，可以得到几乎一致的结果。连续波的规律和处理方法较为简单，这样，给脉冲波反射法检测的实际应用带来了方便。

### 1.2.3 超声脉冲波的频谱

超声波检测中使用的脉冲波通常为窄频带的脉冲波。对于每一振荡周期内振荡次数为10次左右的超声波脉冲，其频率范围一般在标称频率的 $\pm 5\%$ 左右。例如，标称频率为5MHz，则其频带范围为4.75MHz~5.25MHz。

必须指出，任何周期振动都可以分解为一系列简谐振动，非周期的振动也可进一步分解为无限多个频率连续变化的简谐振动，这一概念就为用连续波来处理脉冲波问题提供了基础。

### 1.2.4 波的叠加、干涉及驻波

#### (1) 波的叠加现象

在一个介质中传播的几个声波，如果同时达到某一点，那么，对该点振动的共同影响就是各个声波在该点所引起振动的合成。在任一时刻各质点的位移是各个声波在这一质点上引起的位移的矢量和，这就是声波的叠加原理。叠加之后，每一个波仍保持自己原有的特性（频率、波长、振动方向等），并按自己传播的方向继续前进，好像在各自的途中没有遇到其他波一样。因此，波的传播是独立进行的。

波的叠加可以从许多事实观察到，如两石子落水，可以看到以石子入水处为中心的两个圆形水波的叠加情况和相遇后的传播情况；又如乐队合奏或几个人谈话，人们可以分辨出各种乐器和各人的声音，这些都可以说明波传播的独立性。

#### (2) 干涉现象

一般地说，振幅、频率、周期都不同的几列波在某一点叠加时，这一点的振动将是很复杂的。两列频率相同，振动方向相同，相位相同或相位差恒定的波相遇时，介质中某些地方的振动将相互加强，另一些地方的振动互相减弱或完全抵消，这种现象叫做波的干涉现象。产生干涉现象的波叫干涉波，其波源称为相干波源。

波的叠加原理是波的干涉现象的基础，波的干涉是波动的重要特征。在超声波检测中，由于波的干涉，超声波源附近会出现声压极大值、极小值。

#### (3) 驻波

两列振幅相同但行进方向相反的相干波的叠加所形成的波称为驻波。此时，在空间中合成声压的幅度将随位置不同而出现有极大值和极小值之间的变化，如图1-5所示。对于有限长度的介质，当其长度为半波长或半波长的整数倍时，在长度方向可得明显的驻波。驻波是波动干涉的特例。

设入射波和反射波的波动方程为：

$$y_{\lambda} = A \cos 2\pi (ft - x/\lambda)$$

$$y_{\text{出}} = A \cos 2\pi(f t + x/\lambda)$$

则驻波的波动方程为:

$$y = y_{\text{入}} + y_{\text{出}} = 2A \cos(2\pi x/\lambda) \cos(2\pi f t)$$

由驻波方程可知:

① 驻波波线上各点作振幅为  $|2A \cos(2\pi x/\lambda)|$  的简谐振动。 $x$  满足  $|\cos(2\pi x/\lambda)| = 0$  的那些点, 振幅恒为零, 即这些点始终静止不动, 称为波节。 $x$  满足  $|\cos(2\pi x/\lambda)| = 1$  的那些点, 振幅最大, 为  $2A$ , 称为波腹。波线上其余各点的振幅在 0 和  $2A$  之间。可见, 驻波波线上各点似乎在作分段振动。

② 驻波波线上波节和波腹的位置是特定的, 相邻两波节或波腹的间距可用下述方法求得。

对于波节处  $\cos(2\pi x/\lambda) = 0$ , 有  $2\pi x/\lambda = (2n+1)\pi/2$ , 所以, 波节位置  $x = (2n+1)\lambda/4$ , 于是相邻两波节的间距为  $\Delta x = [2(n+1)+1]\lambda/4 - (2n+1)\lambda/4 = \lambda/2$ 。同理, 可得相邻两波腹的间距也等于  $\lambda/2$ 。由于波节与波腹相间出现, 所以相邻波节与波腹的距离为  $\lambda/4$ 。由此可见, 对于两端固定弦线, 只有当弦线长度等于半波长  $\lambda/2$  的整数倍时, 才能形成驻波, 这就是超声波探头中压电晶片(波源)的设计依据, 即晶片的厚度总为  $\lambda/2$ 。

③ 形成驻波时, 在界面处产生波节还是波腹与两种介质的疏密程度有关, 当波从波疏介质垂直入射到波密介质, 又从波密介质返回到波疏介质时, 在界面反射处产生波节; 反之, 则在界面处产生波腹。如超声波垂直入射到水/钢界面, 就会在水/钢界面处形成位移波节; 超声波垂直入射到钢/水界面就会在钢/水界面处形成位移波腹。

### 1.2.5 惠更斯原理

波动起源于波源的振动, 波的传播须借助于介质中质点之间的相互作用。对于连续介质来说, 任何一点的振动将引起相邻质点的振动。所以, 波前在介质中达到的每一点都可以看作是新的波源(即子波源), 子波源向前发出球面波, 这就是惠更斯原理。例如, 从波源  $O$  点向四周发出球面波(如图 1-6 所示), 则在某一时刻  $t$ , 波传至  $AB$ 。 $AB$  是以  $O$  为球心的球面。球面  $AB$  上各点可看成是无数子波源所组成, 这些子波源以各自的球面波规律向外传播, 到时刻  $t'$  时, 波阵面的新位置就是与这些子波波阵面相切的包迹面, 当然, 新的波阵面是以波源  $O$  为中心的另一个球面。波阵面  $A'B'$  和  $AB$  之间的距离等于波传播速度与波阵面从  $AB$  行进至  $A'B'$  所需要时间的乘积。

平面波的传播方法与上述点源相似, 如图 1-6b 所示。到达  $AB$  的波阵面发出的次级子波, 都是以波阵面上各点为中心的球面。经过一段时间后, 它们的总和可以用包迹  $A'B'$  来

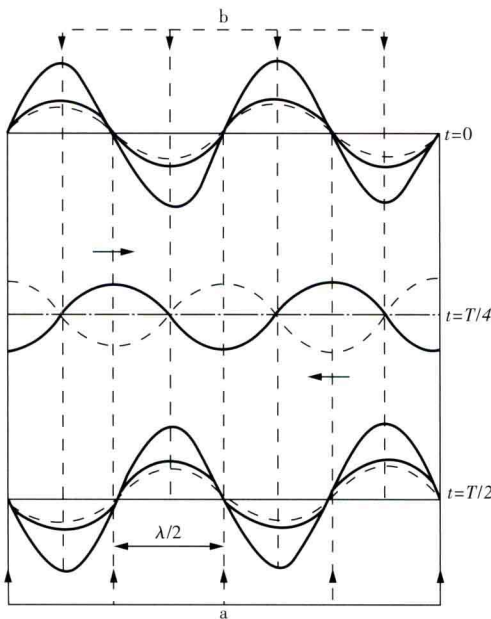


图 1-5 反射形成的驻波

a—波节 b—波腹

表示。在  $A$  点和  $B$  点以外的各点，波动的扩展使波振面不再是平面，但如果  $AB$  长度比波长大得多时，此种效应并不重要。

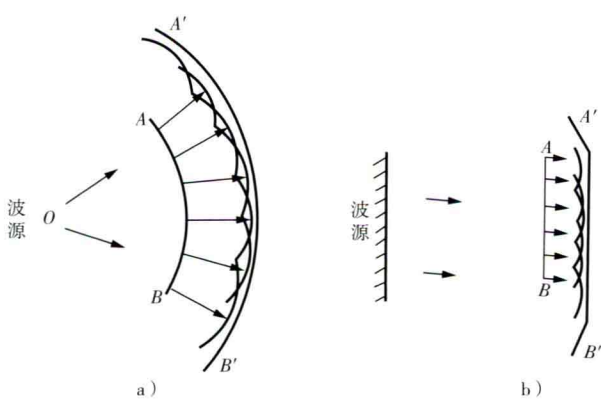


图 1-6 按惠更斯原理作出的新波阵面图  
a) 球面波 b) 平面波

当波在不均匀或各向异性的介质中传播时，同样可用惠更斯原理求出波阵面，但此时形状和传播方向都可能发生变化。

### 1.2.6 超声波的类型

由于声源在介质中施力方向与波在介质中传播方向不同，因此声波的波型也不同。声波的波型一般有下列几种：

#### (1) 纵波 L

介质中质点振动方向与波动传播方向相同，这种波型称为纵波，也叫压缩波或者叫疏密波，用符号  $L$  表示。如图 1-7 所示为纵波波形示意图。当弹性介质受到交替变化的拉伸、压缩应力作用时，受力质点的间距就会相应地产生交替变化的疏密变形。此时，凡是能在拉伸或压缩中变形的介质都能传播纵波。因此，纵波在固体、液体和气体中都能传播，并常用于纵波检测法中。

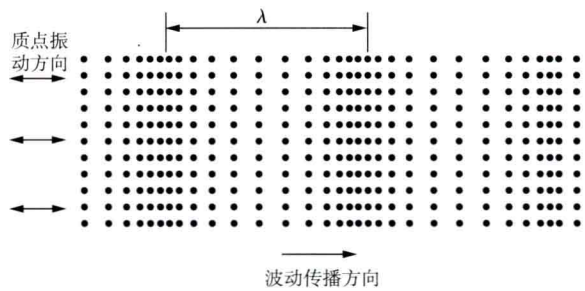


图 1-7 纵波

#### (2) 横波 S

介质中质点振动方向与波动传播方向互相垂直的波称为横波。横波用符号  $S$  表示。如图 1-8 所示为横波波形示意图。当固体弹性介质受到交替变化的剪切应力作用时，介质质点

就会产生相应的横向振动，介质发生剪切变形，此时质点的振动方向与波的传播方向垂直，也称其为剪切波。

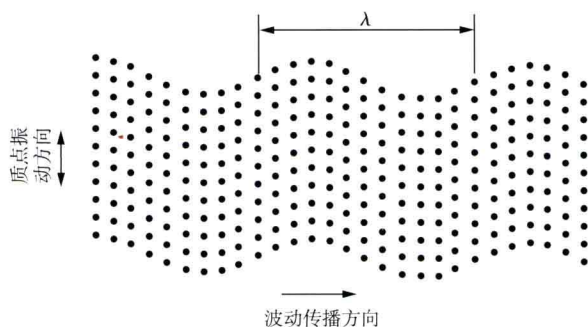


图 1-8 横波

在横波传播过程中，介质的层与层之间出现相应的位移，即剪切变形，因此，能传播横波的介质应是能产生剪切弹性变形的介质。自然界中，只有固体弹性介质具有剪切弹性力，而液体和气体介质各相邻层间可以自由滑动，不具有剪切弹性力（即剪切弹性模量  $G=0$ ），所以，横波只能在固体中传播，气体和液体中不能传播横波与具有横向振动分量的其他波型。

### (3) 表面波

当固体介质表面受到交替变化的表面张力作用时，质点作相应的纵横向复合振动，此时质点振动所引起的波动只在固体介质的表面进行，故称其为表面波。这是瑞利（Rayleigh）于 1887 年首先研究并证实其存在的。表面波是横波的一个特例。根据传播介质厚度与波长的比值大小及质点振动方式和传播速度的不同，它又分为瑞利波和乐普波。

瑞利波是当传播介质的厚度大于波长时，在一定条件下，在无限大固体介质与气体介质的交界面上产生的表面波。瑞利波用符号  $R$  表示。瑞利波使固体表面质点产生的复合振动轨迹是绕其平衡位置的椭圆，椭圆的长轴垂直于波的传播方向，短轴平行于传播方向，如图 1-9 所示。

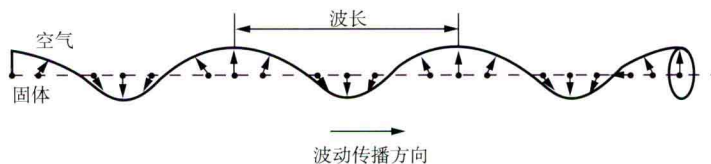


图 1-9 瑞利波

质点振幅的大小（即椭圆长轴轴径的大小）与材料的弹性及瑞利波的传播深度有关，其振动能量随深度增加而迅速减弱。当瑞利波传播的深度在接近一个波长时，质点的振幅已经很小了。

当瑞利波在传播途中碰到棱边时，若棱边曲率半径  $R$  大于 5 倍波长，表面波可不受阻拦地完全通过；当  $R$  逐渐变小时，部分表面波能量被棱边反射；当  $R \leq \lambda$ （波长）时，反射能量很大。超声波检测就是利用这种反射特性来检测工件表面和近表面的缺陷以及用来测定表