

铁路职业教育铁道部规划教材

# 钢轨探伤

GANGGUITANSHANG

TIELU ZHIYE JIAOYU TIEDAOBU GUIHUA JIAOCAI

何学科 主编

中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



铁路职业教育铁道部规划教材

# 钢 轨 探 伤

何学科 主 编  
唐玉生 主 审

中国铁道出版社

2009年·北 京

## 内 容 简 介

本书较为详细地介绍了超声波的基本理论、钢轨伤损及探伤方法、超声波探伤设备、钢轨探伤常用方法以及伤损折断钢轨处理程序。本书配有《钢轨探伤实验实训指导书》。

本书为高职、中专学校铁道工程专业教学用书,也可供钢轨探伤工岗位培训使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

钢轨探伤/何学科主编. —北京:中国铁道出版社,2009.6

铁路职业教育铁道部规划教材

ISBN 978-7-113-09981-7

I. 钢… II. 何… III. 钢轨—探伤—职业教育—教材 IV. U213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 070731 号

书 名:钢轨探伤  
作 者:何学科 主编

---

责任编辑:李丽娟 电话:010—51873135

封面设计:陈东山

责任校对:孙 玫

责任印制:陆 宁

---

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

版 次:2009年6月第1版 2009年6月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:8.5 字数:210 千

书 号:ISBN 978-7-113-09981-7/U·2497

定 价:25.00 元(含实训指导书)

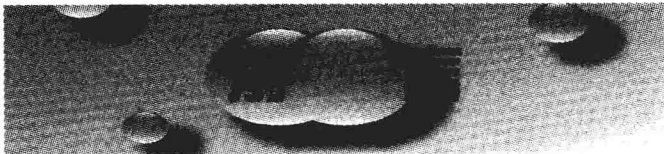
---

### 版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170,路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187



本书由铁道部教材开发小组统一规划,为铁路职业教育规划教材。本书是根据铁路职业教育铁道工程(工务)专业教学计划“钢轨探伤”课程教学大纲编写的,由铁路职业教育铁道工程(工务)专业教学指导委员会组织,并经铁路职业教育铁道工程(工务)专业教材编审组审定。

随着我国经济的快速发展,铁路在国民经济中的作用愈显突出。进入 21 世纪以来,我国铁路进入了大发展的快车道,伴随着六次大面积提速,铁路的运行速度越来越高,载荷越来越大,钢轨出现伤损的可能性也越来越大。提高钢轨探伤人员的素质,加大钢轨探伤的力度,确保铁路行车安全变得尤为重要。本书结合当前铁路现场的实际需要,力求简捷,通俗易懂。

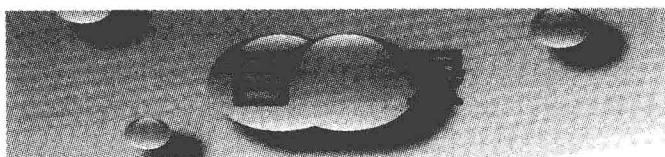
本书重点介绍了超声波的基本理论、钢轨伤损及钢轨探伤方法、常用钢轨探伤仪器设备以及伤损折断钢轨的处理程序,配有《钢轨探伤实验实训指导书》。本书可作为铁道工程(工务)专业的教学用书。

本书由湖南交通工程职业技术学院何学科主编,湖南交通工程职业技术学院唐玉生主审。第一、三、六章由何学科编写,第二章由吉林铁道职业技术学院徐光华编写,第四章由广铁集团工务检测所黄祖泽编写,第五章由湖南交通工程职业技术学院杨锋编写。在编写过程中得到了许多同仁的帮助和指导,在此表示感谢。

限于我们的知识水平和实践能力,书中难免有纰漏和错误,恳请专家和读者批评指正。

编 者

2009 年 3 月



|                     |     |
|---------------------|-----|
| 第一章 概 述             | 1   |
| 第一节 无损检测            | 1   |
| 第二节 无损探伤方法          | 2   |
| 第三节 超声探伤发展概况        | 4   |
| 复习思考题               | 6   |
| 第二章 超声波探伤基础         | 7   |
| 第一节 机 械 波           | 7   |
| 第二节 超 声 波           | 10  |
| 第三节 超声波在异质界面上的反射和透射 | 13  |
| 第四节 远场中规则反射体的反射规律   | 20  |
| 复习思考题               | 22  |
| 第三章 钢轨伤损及探伤方法       | 24  |
| 第一节 钢轨和钢轨伤损         | 24  |
| 第二节 钢轨焊接及焊缝缺陷       | 28  |
| 第三节 钢轨伤损分类、标准及其他    | 30  |
| 第四节 超声波探伤技术         | 34  |
| 复习思考题               | 48  |
| 第四章 钢轨探伤设备          | 50  |
| 第一节 超声波探伤仪          | 50  |
| 第二节 钢轨探伤仪           | 57  |
| 第三节 大型钢轨探伤车         | 71  |
| 第四节 超声波探头           | 77  |
| 第五节 试 块             | 81  |
| 第六节 仪器和探头性能指标的测试    | 85  |
| 复习思考题               | 89  |
| 第五章 钢轨探伤            | 90  |
| 第一节 70°探头的探伤        | 90  |
| 第二节 37°探头的探伤        | 100 |
| 第三节 0°探头的探伤         | 106 |
| 第四节 钢轨焊缝探伤方法        | 111 |
| 第五节 钢轨手工检查          | 122 |
| 复习思考题               | 125 |
| 第六章 伤损折断钢轨处理程序      | 126 |
| 参考文献                | 130 |

# 第一章

---

## 概述

随着机械、石油化工、交通运输、造船、航天以及核能等工业的迅速发展,对产品质量的要求越来越严格,尤其是随着动力机械和高压容器向高速、高温、高压方向发展,对产品内在缺陷尺寸提出了精确的定量要求。因此,无损检测技术也获得了迅速的发展和广泛的运用。

### 第一节 无损检测

所谓无损检测(NDT)是指在不损坏被检物体的内部结构和使用性能的前提下,借助于各种物理手段,对材料、构件或设备进行宏观与微观缺陷检测、几何特性测量、化学成分、组织结构和力学性能变化的评定,并进而就材料或构件对特定应用的适应性做出评价的一门学科。

#### 一、无损检测的特点

1. 不破坏被检对象;
2. 可以实现 100% 的检验;
3. 通过无损检测,发现缺陷并作出评价,以保证材料或工件的质量;
4. 可对关键部件或关键部位在使用中定期检查,甚至长期监控,以保证运行安全,避免发生事故;
5. 通过检出的缺陷,找出其形成原因和规律,可促使有关部门采取措施,改进设计或工艺,从而进一步提高产品质量,防止和降低出废品。

#### 二、无损检测的作用

无损检测是提高产品质量,确保安全的重要手段,具有很大的经济效益和社会效益,其作用主要有:

1. 无损探伤——对产品质量作出评价。通过对构件等进行探测发现它的表面或内部缺陷,并进行定位定量分析。
2. 材料检查——用无损检测技术测定材料的物理性能和组织结构,能判断材料的品种和热处理状态,进行材料分选。
3. 几何度量——产品的几何尺寸、涂层和镀层厚度、表面腐蚀状态、硬化层深度和应力状态都能用无损检测技术测定。
4. 现场监控——对在役设备或生产中的产品进行现场的或动态的检测,将产品中的缺陷变化信息连续地提供给运行和生产部门实行监控。

### 三、无损检测的发展

无损检测的作用和特点表明,无损检测技术是工业发展必不可少的有效工具,它必将随着工业生产的进步而发展。早期的无损检测称为无损探伤(NDI),它的作用是在不损坏产品的前提下发现人眼无法看到的缺陷,以满足工程设计中的强度要求。第二阶段称为无损检测(NDT),这个阶段始于20世纪70年代,它不但检测最终产品,而且要测量各种工艺参数,制成工件后还需知道它的组织结构、晶粒大小和残余应力等。第三阶段称为无损评价(NDE),它对航空、航天、核电、能源、交通、石油和化工等方面的机械产品尤为重要,在加强检测同时注重产品质量的评价,确保每一件产品都是合格的。在工业发达国家已从一般无损评价发展到自动无损评价,采用计算机来进行检测和评价,尽可能减少人为因素的影响,这在超声检测的发展中尤为突出,例如钢轨探伤车。这种发展趋势促使无损检测人员应具有更广的知识面,更深厚的基础理论和更强的综合分析能力。

## 第二节 无损探伤方法

无损探伤方法种类很多,每种无损探伤方法都有其优点和局限性。使用时必须根据被检对象材料种类、缺陷性质和可能产生的部位,有针对性地选择最合适的探测方法。目前,广泛使用的常规方法有以下五种。

### 一、射线探伤(RT)

射线探伤是利用X、 $\gamma$ 和中子等射线在透过工件和缺陷时衰减程度不同的特性,在胶片和荧光屏上得到伤损图形的探伤方法。

射线探伤原理如图1-1所示。射线源向工件发出射线,因工件的材料结构不同或有缺陷存在,使透过工件的射线强度发生不均匀变化。这些变化经照相底片感光 and 显影处理后,可获得与工件结构和缺陷相对应的投影图象。通过对图象的观察分析,确定工件内缺陷的种类、大小和分布状况。射线探伤只适用于体积型缺陷探测,如气孔、疏松等,对片状缺陷较难检出。

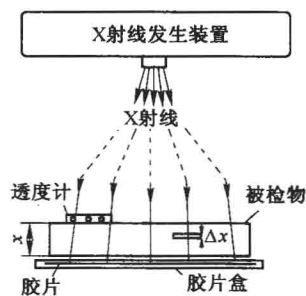


图1-1 缺陷的射线照相

### 二、磁粉探伤(MT)

磁粉探伤是将铁磁材料直接通以电流( $I$ )或置于磁场( $H$ )之中,使其磁化,磁力线遇到缺陷时,会绕过缺陷而产生漏磁,漏磁场将吸引磁粉,从而显示缺陷存在的方法(图1-2)。

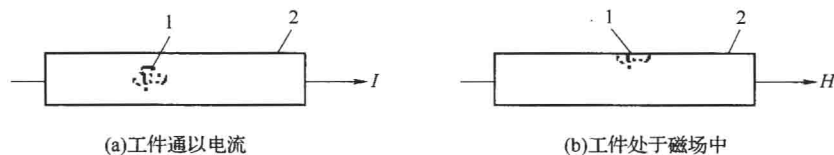


图1-2 磁粉探伤原理

1—缺陷;2—工件。

磁粉探伤仅适用于铁磁材料的表面或近表面缺陷的检测,其探伤灵敏度的高低受到表面

光洁度、缺陷形状和取向、磁化方法和范围等影响。磁粉探伤能确定缺陷的位置、大小和形状，但难以确定缺陷的深度。

### 三、渗透探伤(PT)

渗透探伤有着色探伤和荧光探伤两种方法。其原理是在清洗过的工件表面施加含有色泽和荧光物质的渗透剂，由毛细管现象使之渗入缺陷并留在空腔内，然后洗去表面多余的渗透剂，再涂上一层显像剂，借毛细管吸附作用，使缺陷中的渗透剂吸出。通过色泽对比或紫外线照射激发荧光物质发光，从而将缺陷的图像显示出来(图 1-3)。

渗透探伤适用于探测金属材料和致密性非金属材料的缺陷，能发现表面开口的裂纹、折叠、疏松、针孔等，通常也能确定缺陷的位置、大小和形状，但难以确定缺陷的深度。渗透探伤不适用于探测疏松及多孔材料的缺陷。

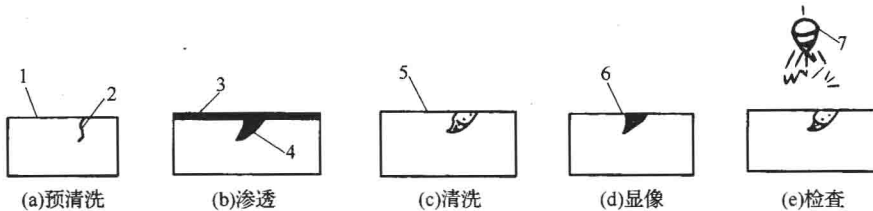


图 1-3 渗透探伤原理

1—油污；2—缺陷；3—渗透剂；4—渗透；5—清洗剂；6—显像剂；7—紫外线灯。

### 四、涡流探伤(ET)

涡流探伤的原理是将载有交变或脉冲电流的试验线圈靠近导电工件，在工件表面内电磁感应产生涡电流，而感生的涡电流又产生磁场，反作用于原试验线圈的磁场，形成叠加磁场。当工件内有缺陷时，涡电流因流动途径的变化，使涡电流磁场也相应变化，经试验线圈检出异常磁场的变化量，可获得缺陷的信息，见图 1-4。

涡流探伤主要适用于金属和石墨等导电材料表面和近表面缺陷的检测，通常能够确定缺陷的位置和相对尺寸。涡流探伤不适用于非导电材料的缺陷检测。

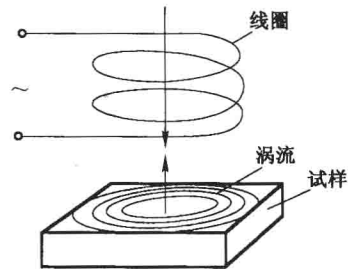


图 1-4 涡流探伤原理

### 五、超声探伤(UT)

超声波探伤是利用超声波入射被检工件，当超声波遇有缺陷时产生反射回波，或者穿透波被衰减来判断工件内部是否有缺陷存在，缺陷的位置和大小。超声探伤主要检测工件内部缺陷，同时也可发现工件表面的裂纹，是五大常规无损探伤中应用最广泛的一种检测方法。有关探伤原理及其检测方法将在以后章节中作重点介绍。

射线、超声、磁粉、涡流、渗透五大常规探伤方法是现代工业生产中应用最普遍，也是较为成熟的方法。其中射线、超声探伤主要探测工件内部缺陷。对厚度不大，形状比较复杂的工件内部缺陷的精确定性、定量，射线探伤比超声探伤具有优势，而工件厚度较大的内部缺陷检测，超声探伤又优于射线探伤。磁粉、涡流、渗透主要检测工件表面细微缺陷，只是磁粉探伤仅限



于铁磁材料,涡流探伤仅限于导电材料,渗透探伤虽不受上述限制,但只能探测工件表面开口的缺陷。因而五种方法各有其优越性(表 1-1),如能合理配合应用,将会得到更好的检测效果。

表 1-1 五种无损探伤方法比较

| 项 目<br>探伤方法 | 优 点                                                                                                                                                                                                           | 缺 点                                                                                                                                                                                                         | 适 用 范 围                                                                |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 超声探伤        | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 对确定内部缺陷大小、位置、取向、埋深、性质等比其他方法有优势;</li> <li>2. 适用广泛、使用灵活、费用低廉</li> </ol>                                                                                               | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 难于对缺陷作精确定性和定量;</li> <li>2. 一般需用耦合剂,对试件形状的复杂性有一定限制</li> </ol>                                                                                                      | 可用于金属、非金属及复合材料的铸、锻、焊件与板材                                               |
| 射线探伤        | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 适用于几乎所有材料;</li> <li>2. 探伤结果(底片)显示直观、便于分析;</li> <li>3. 探伤结果可以长期保存;</li> <li>4. 探伤技术和检验工作质量可以监测</li> </ol>                                                            | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检验成本较高;</li> <li>2. 对裂纹类缺陷有方向性限制;</li> <li>3. 需考虑安全防护问题(如 X、<math>\gamma</math> 射线的传播)</li> </ol>                                                                 | 检测铸件及焊接件等构件内部缺陷,特别是体积型缺陷(即具有一定空间分布的缺陷)                                 |
| 磁粉探伤        | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 直观显示缺陷的形状、位置、大小;</li> <li>2. 灵敏度高,可检缺陷最小宽度约为 <math>1\mu\text{m}</math>;</li> <li>3. 几乎不受试件大小和形状的限制;</li> <li>4. 检测速度快、工艺简单、费用低廉;</li> <li>5. 操作简便、仪器便于携带</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 只能用于铁磁性材料;</li> <li>2. 只能发现表面和近表面缺陷;</li> <li>3. 对缺陷方向性敏感;</li> <li>4. 能知道缺陷的位置和表面长度,但不知道缺陷的深度</li> </ol>                                                         | 检测铸件、锻件、焊缝和机械加工零件等铁磁性材料的表面和近表面缺陷(如裂纹)                                  |
| 渗透探伤        | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 设备简单,操作简便,投资小;</li> <li>2. 效率高(对复杂试件也只需一次检验);</li> <li>3. 适用范围广(对表面缺陷,一般不受试件材料种类及其外形轮廓限制)</li> </ol>                                                                | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 只能检测开口于表面的缺陷,不能显示缺陷深度及缺陷内部的形状和尺寸;</li> <li>2. 无法或难以检查多孔的材料,检测结果受试件表面粗糙度影响;</li> <li>3. 难于定量控制检验操作程序,多凭检验人员经验、认真程度和视力的敏锐程度;</li> <li>4. 探伤技术和检验工作质量可以监测</li> </ol> | 用于检验有色和黑色金属的铸件、锻件、粉末冶金件、焊接件以及各种陶瓷、塑料、玻璃制品的裂纹、气孔、分层、缩孔、疏松、折叠及其他开口于表面的缺陷 |
| 涡流探伤        | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 适于自动化检测(可直接以电信号输出);</li> <li>2. 非接触式检测,无需耦合剂且速度快;</li> <li>3. 适用范围较广(既可检测缺陷也可检测材质、形状与尺寸的变化等)</li> </ol>                                                             | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 只限于导电材料;</li> <li>2. 对形状复杂试件及表面下较深部位的缺陷检测有困难,检测结果尚不直观,判断缺陷性质、大小及形状尚难</li> </ol>                                                                                   | 用于钢铁、有色金属等导电材料所制成的试件,不适于玻璃、石头和合成树脂等非金属材料                               |

### 第三节 超声探伤发展概况

#### 一、超声探伤的历史和现状

超声探伤是指超声波在被检材料中传播时,根据材料中缺陷所显示的声学性质对超声波传播的影响来检测其缺陷的方法。这种方法在很早以前就被人类所采纳。例如敲打物体听其声音来判断被检物体是否有损伤就是一种原始的检测手段。钢轨的手工检查就是这种方法的

沿袭。

真正应用超声进行探伤是近半个世纪的事情。尤其在第二次世界大战爆发以后,超声探伤技术得到了迅速发展。从 1936 年德国研制了穿透式探伤仪后,美国、英国相继制成脉冲反射式探伤仪,法国利用声脉冲反射原理研制出声呐设备,用于探测潜水艇。许多工业发达国家采用 A 型脉冲反射式探伤仪进行钢铁、造船和机械制造中的探伤。到 20 世纪 50 年代后期超声检测已在医疗领域内被广泛应用,随后利用衰减器进行缺陷定量,超声全息回波频谱的分析、焊缝缺陷的评估、数字式探伤仪和成像技术都有了突破性发展。

我国从 20 世纪 50 年代开始引进超声波探伤技术,40 多年来发展很快,尤其在固体小缺陷对声波的散射理论研究上;在电磁超声、高温检测、表面波、板波探伤技术上;在通用型、便携式、多通道和 C 扫描成像探伤仪的开发应用上,达到了国际先进水平。

近几年来超声探伤技术发展更快,材料性能的检测和评价;电磁超声、激光超声、空气耦合超声等非接触超声探伤技术的发展,高频超声对陶瓷材料、集成电路和低密度芯片黏结材料的探测,以及采用微波处理技术,对超声波探伤仪进行自动选择探测参数,校准操作工艺,判断检测结果,记录和储存检测数据都取得了显著进展,使超声探伤技术进入了全新阶段。

## 二、超声探伤的优点和缺点

分析超声探伤的优点,一是寻求超声探伤之所以得到迅速发展的依据。二是要重视超声探伤的不足之处,更好地指导我们的探伤实践。

### (一) 优点

1. 穿透能力强,可测厚度大,一般可达数米,是探伤方法中可测厚度最大者。
2. 检测灵敏度高,一个存在于钢中的空气分层厚度为  $10^{-6}$  mm,反射率已有 21%,当厚度为  $10^{-5}$  mm 时,反射率可达 94%,其检测灵敏度居所有无损检测方法之首。
3. 可适用多种波型、各种探头作不同方向的探测,能探出工件内部和表面各种取向的缺陷。
4. 指向性好,能方便、准确地对缺陷定位。随着成像技术的发展,缺陷的定位、定量更加准确和直观。
5. 检测速度快,费用低。即使手工操作,超声波探伤的速度也比其他方法快,且无需防护和固定工作场所。实施时仅损耗少量电能和耦合剂。在计算机与检测设备形成一体后,检测速度将大大领先于各类探伤方法。

### (二) 缺点

1. 探测的结果受人的因素影响。在计算机还未被广泛运用于超声检测技术前,一般对缺陷的发现与评价,仅凭仪器示波屏上显示的探伤图形而定,而图形中的回波信号高度、位置、数量等有限信息又取决于探伤人员对仪器的调节和判断,因此需要较多的实践经验。
2. 探测表面要求加工。无论是常规探伤或是高速自动化探伤都要求探头与工件的探测面要有良好的耦合。通常耦合越良好,入射声能越强,缺陷检出率也越高,因此探测表面的加工是提高探伤质量的重要前提。
3. 受工件形状、晶粒和组织不均匀性的限制。形状复杂的工件超声波探伤困难,形状回波的显现将干扰缺陷回波的识别和测定。对粗晶工件(例如高锰钢辙叉)特别是奥氏体不锈钢,硬质合金堆层等,因其晶体尺寸与超声波长接近,故增加了探伤难度。
4. 定位精度差。以回波信号为判伤依据的超声波探伤所测出的缺陷当量或延伸度与实

实际缺陷大小均有一定的误差。

### 复习思考题

1. 什么叫无损检测？其重要作用有哪些？
2. 目前有哪五种常规的无损探伤方法？分别说明它们的探伤原理和适用范围。
3. 什么叫超声探伤？超声探伤有哪些优缺点？在实际探伤中如何克服超声探伤的不足从而提高检测质量？

# 第二章

## 超声波探伤基础

### 第一节 机械波

#### 一、机械波的产生

物体(或物体的一部分)在其平衡位置附近作往复运动叫机械振动,简称振动。机械振动在介质中的传播称为机械波。例如水波是在水中传播的,声波是在空气中传播的,由弹性力联系着的质点所组成的物质,称为弹性介质。在弹性介质中,任何一个质点作机械振动时,它的振动会传递给邻近的质点,使邻近的质点也产生同样的振动,然后将振动传给下一个质点。这样振动就会以一定的速度由近及远的向各个方向传播,从而形成机械波。因此机械波的产生必须具备两个条件:一是要有作机械振动的振源(即声源),二是要有能够传递机械振动的介质(即弹性介质),两者缺一不可。

#### 二、机械波的分类

人们把振动在介质(如空气、水等)中的传播过程,称为波动,简称波。波是物质的一种运动形式,可分为电磁波和机械波两类。电磁波是交变电磁场在空间的传播过程,如无线电波、红外线等,而机械波是指机械振动在弹性介质中的传播过程,如水波、超声波等。机械波的分类方法很多,可以按质点振动方向、振动持续时间以及波的形状等来分。以质点振动方向与波传播方向的相对关系来表征的在介质中传播的波的类型称为波形。由于声源在介质中施力方向与波在介质中传播方向的不同,机械波的波形主要有以下几种。

##### (一)纵波(L)

声波在介质中传播时,介质质点的振动方向与波的传播方向一致的波(图 2-1)称为纵波,用字母 L 表示。纵波在传播过程中,会引起质点间的压缩和伸长,故又称“压缩波”或“疏

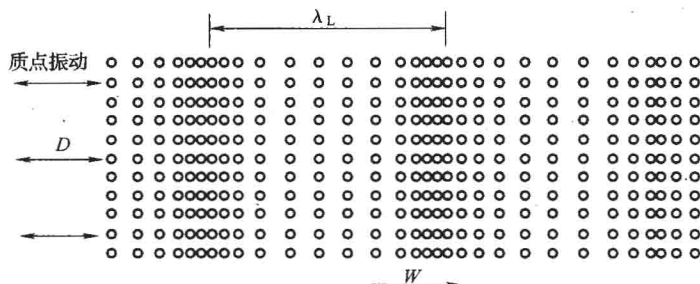


图 2-1 纵波

D—质点移动方向;W—波的传播方向。

密波”。任何弹性介质在体积发生变化时都会产生弹性力,纵波能在各种弹性介质(包括固体、液体、气体)中传播。

## (二)横波(S)

声波在介质中传播时,介质质点的振动方向与波的传播方向垂直的波(图 2-2)称为横波,用 S 表示。横波传播时,介质受到交变的剪切力作用而相应的变形,质点作起伏相间的运动,故又称“切变波”。固体除具有体积弹性外,还具有剪切弹性,而液体和气体没有剪切弹性,所以横波只能在固体中传播。

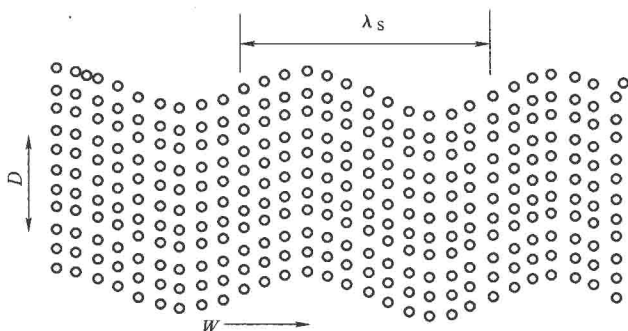


图 2-2 横波  
 $D$ —质点移动方向; $W$ —波的传播方向。

## (三)表面波(R)

质点的振动沿材料表面进行传播的波,称为表面波(图 2-3)。表面波又称“瑞利波”。常用于检验工件表面裂纹及渗碳层或覆盖层的表面质量。

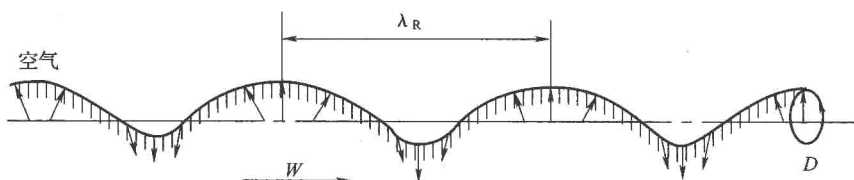


图 2-3 表面波  
 $D$ —质点振动轨迹; $W$ —波的传播方向。

## (四)板波(P)

在无限大板状介质(具有上下两个平行自由界面)中传播的一种声波称为板波。其类型很多,主要的一种是兰姆波,故又称兰姆波。板波仅在频率、入射角及板厚为特定值时才产生。有板波传播的工件中两个表面和中间的质点都发生振动,且质点振动的轨迹为椭圆,其传播速度与材质、板厚及频率有关。在板波传播中,按振动的形态分为对称型和非对称型两种。其中两个表面质点振动相位相反,中间以纵波形式振动为对称型(图 2-4a);两个表面质点振动相位相同,中间以横波形式振动为

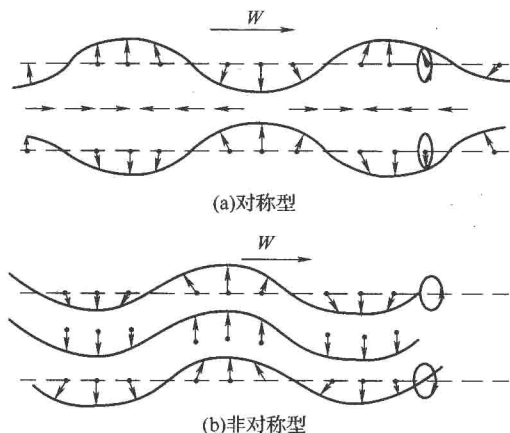


图 2-4 板波  
 $W$ —波的传播方向。

非对称型(图 2-4b)。

### 三、描述波的主要物理量

描述波的物理量有多种,常用的有波速、波长、频率和周期等物理量,它们间有着密切的关系。

#### (一)波速( $c$ )

波在单位时间内传播的距离称为波在该介质中传播的速度,简称为波速。用符号  $c$  表示。波速常用单位为  $\text{m/s}$ 。声波在介质中的传播速度又叫声速。

波速随传播波的材料特性及波形不同而有所差异。

1. 不同波形的波,在同一材料中传播速度各不相同。钢材中纵波速度约为横波速度的 1.82 倍,反之横波速度约为纵波速度的 0.55 倍,表面波速度最小,约为横波速度的 0.9 倍。

2. 同一波形的波其传播速度在不同材料中传播时,波速不同。纵波在钢中的传播速度是它在有机玻璃中速度的 2.1 倍,是它在水中传播速度的约 4 倍。

#### (二)波长( $\lambda$ )

在波的传播方向,两个相邻同相位质点的距离(即一个完整波的长度)称为波长。一般相邻两压缩区(或伸长区)之间的距离称为纵波波长(图 2-1),用符号  $\lambda_L$  表示;相邻两相应的波峰(或波谷)之间的距离称为横波波长(图 2-2),用符号  $\lambda_s$  表示。探伤中常用的波长单位为  $\text{mm}$ 。

#### (三)频率( $f$ )

单位时间内(每秒钟)质点完成全振动的次数称为频率。每秒钟质点完成一次全振动称为 1 赫兹(简称赫)用符号  $\text{Hz}$  表示。频率的单位还有千赫( $\text{kHz}$ )和兆赫( $\text{MHz}$ ),它们之间的关系为:

$$1 \text{ 兆赫}(\text{MHz}) = 10^3 \text{ 千赫}(\text{kHz}) = 10^6 \text{ 赫}(\text{Hz})$$

常用频率单位是兆赫( $\text{MHz}$ )。探伤中常用的频率为  $0.5 \sim 10 \text{ MHz}$ ,也称为检测频率。一般钢轨探伤仪的检测频率为  $2 \text{ MHz}$ 。在实际探伤中往往会遇到重复频率的概念,其含意是指每秒钟内脉冲发生器激励探头晶片的脉冲次数。为了提高探伤速度,一般要求重复频率越高越好,但过高的重复频率,会导致发射和接收间的干扰,产生幻象回波。因此,重复频率应根据被检工件的大小,一次声程所需要的时间,仪器接收和发射超声波的能力以及探伤速度等多方面因素决定。目前钢轨探伤仪的重复频率在  $500 \sim 1\,000 \text{ Hz}$  之间,适用于步行检测速度,如速度过快会导致漏检。

#### (四)波长、频率和波速三者的关系

$$c = f \cdot \lambda \quad \text{或} \quad \lambda = c / f$$

在同一介质中,当改变频率时,只改变波长,波速不变。波长与频率成反比。表 2-1 为钢轨探伤中常用材料的声速和波长。

表 2-1 常用材料的声速和波长

| 材 料                   | 声 速( $\text{km/s}$ ) |      | 纵波波长( $\text{mm}$ ) |         |
|-----------------------|----------------------|------|---------------------|---------|
|                       | 纵 波                  | 横 波  | 2 MHz               | 2.5 MHz |
| 钢                     | 5.9                  | 3.23 | 2.95                | 2.36    |
| 有机玻璃                  | 2.73                 | 1.43 | 1.37                | 1.09    |
| 尼龙 1010               | 2.4                  | —    | 1.2                 | 0.96    |
| 水                     | 1.48                 | —    | 0.74                | 0.59    |
| 油                     | 1.4                  | —    | 0.70                | 0.56    |
| 空 气                   | 0.34                 | —    | 0.17                | 0.14    |
| 钢中横波波长( $\text{mm}$ ) |                      |      | 1.62                | 1.29    |

## 第二节 超 声 波

### 一、超声波的产生及特性

声波是声源的振动在介质中传播而产生的,如果以频率( $f$ )来表征声波,并以人的可感觉频率为分界线,可把声波划分为次声波( $f < 20\text{ Hz}$ ),可闻声波( $20\text{ Hz} \leq f \leq 20\text{ kHz}$ )及超声波( $f > 20\text{ kHz}$ )。超声波是指频率约高于  $20\text{ kHz}$ (超过人耳可听范围)的声波。原则上凡是能将其他形式能量转换成超声振动方式的能量都可以产生超声波,如机械方法、热效应法、磁伸缩法和电磁声法。在超声探伤中应用最广的是利用某些压电材料(如石英、锆钛酸铅等)的压电效应,来实现超声波的发射和接收。当晶片上受到交变应力(即机械振动)时,它将同步产生交变电场(称正压电效应),相反在交变电场作用下,它又会产生与电场同步伸缩的机械振动(称逆压电效应)。探伤仪上的探头晶片就是通过逆压电效应产生超声波的,而正压电效应形成的交变电场,转换成电信号,输入探伤仪,由荧光屏显示出接收信号。

超声波因为波长较短,即使小缺陷引起的反射也比较大。超声波探伤由于具有较高灵敏度,设备比较简单,对人体无害,检测费用低,易于实现自动化等,因此使用极为广泛。然而,在当前技术条件下,还存在某些不足之处,如判伤不直观,定性定量困难,对检测的结果缺少客观记录和评价方法,在某种情况下应用受到局限,如对奥氏体钢和其他粗晶材料、表面粗糙和形状复杂的工件难以检测。

### 二、超声波的主要特征参数

描述超声波在介质中传播的主要参数除声速、频率、周期、波长以外,还有声压  $p$ 、声强  $I$  及声阻抗  $Z$ 。

#### (一) 声压( $p$ )

垂直作用于单位面积上的压力称为压强。介质不受外力作用时本身所具有的压强叫静压强。当介质中有超声波传播时,由于介质质点的振动,产生了附加压强。附加压强是介质质点某时所受的瞬时压强和没有超声波存在时的静态压强之差,也称为超声波的声压。它是力的概念。介质中每一点的声压是一个随时间、距离而变化的量,声压的绝对值与声速和频率成正比,所以置于同一超声场的介质中以固体介质的声压最高,液体其次,气体中声压最小。就不同固体而言,声压因材料性质、密度( $\rho$ )和声速( $c$ )的差异也有所不同。

#### (二) 声阻抗( $Z$ )

介质中任何一点的声压和该质点的振速之比,称为声阻抗。对平面波而言,声压与振动速度同相位,声阻抗为一恒定值,通常用介质的密度( $\rho$ )和速度( $c$ )的乘积表示,即  $Z = \rho c$ 。声阻抗是一个重要参数,表示在超声场内,介质质点振动难易的程度,因为声阻抗对超声波的传播有阻尼作用。

#### (三) 声强( $I$ )

声强是声强度的简称。它表示单位时间内在垂直于声束传播方向的介质单位面积上所通过的平均声能量,即声波的能流密度。同一介质中,声强与声压平方成正比,所以超声波探伤时示波屏上显示的反射体回波高度只与其反射声压成正比,而与声强之间不成线性关系。 $I = p^2 / (2Z)$ 。

#### (四) 分贝(dB)

在超声场内由于声强的变化范围很大,数量级可以相差很多,用通常数字表示和运算很不

方便,并且人耳对声音响度的感觉近似地与声强的对数成正比,于是采用对数(贝尔)来表示两个声波强度之比:

$$\text{贝尔数} = \lg \frac{I_1}{I_2} \quad (\text{贝尔})$$

实用上,贝尔这个单位太大,通常取其十分之一表示,称为分贝,用符号 dB 表示。两个声强比即:

$$\text{分贝数} = 10 \lg \frac{I_1}{I_2} \quad (\text{dB})$$

因为声强与声压的平方成正比,即  $I = \frac{p^2}{2Z}$ ,且同一介质中  $Z_1 = Z_2$ ,所以:

$$\Delta \text{dB} = 10 \lg \frac{\frac{p_1^2}{2Z_1}}{\frac{p_2^2}{2Z_2}} = 10 \lg \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^2 = 20 \lg \frac{p_1}{p_2}$$

当超声探伤仪具有较好的放大线性(垂直线性)时,示波屏上的回波高度与反射声压具有良好的线性关系。则

$$\Delta \text{dB} = 20 \lg \frac{p_1}{p_2} = 20 \lg \frac{H_1}{H_2}$$

由此表明分贝是两个振幅和强度比的对数表示。在探伤中用分贝表示超声场变化范围的声压增减量或衰减量,不仅直观而且计算方便。例如:一处声压  $p_1$  为另一处声压  $p_2$  的两倍(或一处缺陷反射波高为另一处缺陷反射波高的两倍),则可按上式算出两处声压的差值为 6 dB,若两处声压比为 10,则声压差为 20 dB,如果计算结果为负值,表明前一个声压比后一个声压小。常用声压比所对应的分贝值见表 2-2。

表 2-2 常用声压比所对应的分贝值

|                       |    |    |     |   |   |
|-----------------------|----|----|-----|---|---|
| $p_1/p_2$ 或 $H_1/H_2$ | 7  | 5  | 3   | 2 | 1 |
| $\Delta \text{dB}$ 值  | 17 | 14 | 9.5 | 6 | 0 |

利用上表,根据对数法,可以推算出不同声压(波高)比相对应的分贝差值。

### 三、超声场的结构及声压分布规律

充满超声波的空间称为超声场。从物理学观点来看,超声场是没有边界的,一个声源所产生的超声波在无穷大的弹性介质中将传播到无穷远处,但超声波探伤所要探测的对象(工件)都是有一定范围、尺寸和形状有限介质,因此我们主要研究离辐射声源一定距离或范围内的超声场,并用声压、声阻抗和声强几个物理量加以描述。

#### (一)超声场的结构

超声场的形貌随波源和传播介质形状、尺寸等不同而各异。一般以圆形晶片辐射声波来描述超声场的结构(图 2-5)。

当晶片在高频电场作用下产生振动,经耦合向工件辐射时,该波源可看作由无数的子波组成,每个子波在空间发出球面波,相互叠加形成超声场的特殊结构。

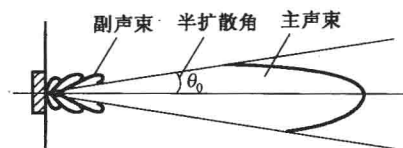


图 2-5 晶片辐射声场示意图



## (二) 超声场中声压分布规律

图 2-6 为圆晶片声轴上的声压分布曲线, 由此可将晶片辐射声场分成以下两个区域:

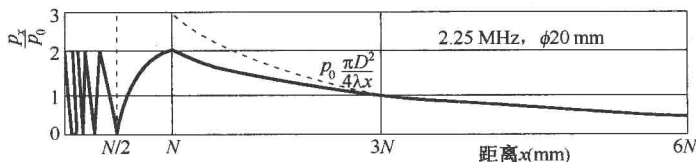


图 2-6 圆盘源中心轴线上的声压分布

$$p_x/p_0 - \text{声压振幅}; x - \text{距离}; p_x = 2p_0 \sin\left[\frac{\pi}{\lambda} \left(\sqrt{\frac{D^2}{4} + x^2} - x\right)\right]$$

1. 近场区 ( $0 \leq x \leq N$ )

邻近换能器并具有复杂声束能量的区域叫近场区, 又称近场干涉区。近场内声轴上的声源高低起伏变化剧烈, 距声源越近, 声压最大值和最小值的点分布越密。由于近场区声压分布的复杂性, 对检测和定量带来一定的困难, 应尽量避免在近场区探伤、定量。

主声轴线上最后一个声压最大值与晶片表面间的距离称为近场区长度, 用符号“ $N$ ”表示, “ $N$ ”值以内的区域为近场区。“ $N$ ”值的大小与晶片直径  $D$  和波长  $\lambda$  有关, 一般  $D \gg \lambda$ , 则直探头近场区长度的计算可以简化为:

$$N \approx D^2 / 4\lambda = A / \pi\lambda$$

式中  $N$ ——近场长度;

$D$ ——圆晶片直径;

$A$ ——方晶片(或矩形晶片)面积;

$\lambda$ ——纵波波长。

斜探头在计算“ $N$ ”值时, 由于声束有了折射(图 2-7), 所以先需算出晶片在投射后的有效面积, 然后再进行换算, 即

$$N = \frac{A_0}{\pi\lambda} = \frac{A}{\pi\lambda} \cdot \frac{\cos \beta}{\cos \alpha}$$

式中  $A_0$ ——晶片有效面积;

$\lambda$ ——横波波长;

$\beta, \alpha$ ——横波折射角和纵波入射角。

2. 远场区 ( $x > N$ )

近场以远的声场即“ $N$ ”值以外的区域称为远场区。在远场区内超声波以一定的指向角传播, 而且随着距离的增大, 声压幅值呈单调下降。当  $x > 3N$  时, 声压的变化规律和球面波相似, 因此在探讨远场中声压变化规律时均运用球面波声压关系式进行计算。

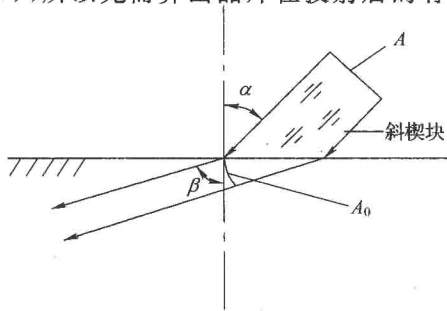


图 2-7 斜探头近场  $N$

## 四、超声场的指向特性

## (一) 指向特性和指向角

1. 超声能量集中在一个方向发射的特性称为指向性(图 2-8)。从图中可知, 晶片发出的超声波如手电筒发出的光柱一样, 在靠近晶片较短的范围可看做是直线传播, 经过一段距离后, 按一定角度扩展辐射。所以把  $1.67 N$  区域称为非扩散区, 大于  $1.67 N$  区域称为扩散区。