

铁路职工岗位培训统编教材

# 钢 轨 探 伤 工

陈春生 主编

刘伯川 主审

中 国 铁 道 出 版 社

1996年·北京

## 内 容 简 介

本书主要包括:超声波探伤的基本原理、钢轨探伤的主要仪器、探伤技术方法及要求、钢轨焊缝探伤、钢轨手工检查及探伤车等,并附有复习思考题和教学参考学时表,可供钢轨探伤工岗位培训使用。

# 前 言

“岗位培训是对从业人员按照岗位需要在一定政治、文化基础上进行的以提高政治思想水平,工作能力和生产技能为目标的定向培训。”

岗位培训的专业教材应具有针对性和实用性。针对性,就是要从岗位的实际需要出发,教材的内容应当包括岗位职责要求,技术装备现状和生产管理要求;实用性,就是从培训对象的实际出发,教材所给的知识含量是必备的,而且要体现以提高技能为中心。

为了给铁路运营系统主要工种的工人岗培提供一套适用性较好、可读性较强的教材,以进一步提高培训的质量和效益,更好地为铁路运输安全生产服务,根据铁道部教育司、劳资司教职[1991]38号文件精神,由铁道部各业务局和教育司共同牵头组织统编铁路运营系统工人岗位培训教材。

这套教材包括或覆盖铁路运输(车务、客运、货运、装卸)、机务、车辆、工务、电务部门的133个工种(职名),计划在“八五”期间基本完成。这次统编教材是以新颁《铁路工人技术标准》为依据,以专业知识为主要内容,本着针对性强、实用性好、并突出技能训练的原则组织编写的。它既可以作为工人新职、转岗、晋升的规范化岗位培训教材,适用于各级职工学校、站段教育室教学,也可以作为适应性岗位培训的选学之用,还可作为职工自学的课本,同时,每章后面列复习、思考、练习

题,作为考工的参考题。总之,这套教材的出版力图促进培训、考工一体化的目标,得以逐步实现。

本书由陈春生、聂建复、徐丰年、马跃平同志共同编写,其中钢轨及其探伤方法由陈春生编写;探伤管理及探伤车由聂建复编写;仪器电路原理及检修由徐丰年编写;概述及超声波探伤原理由马跃平编写,汪至中、洪仲付等同志在本书编写过程中给与了热情指导和帮助。全书由陈春生主编;铁道部工务局刘伯川主审。书稿完成后,经1994年7月呼和浩特审稿会对其框架结构和内容进行了深入的探讨,并提出了若干修改意见,由作者进行了修改和调整。经铁道部工务局、教育司审定,作为全路运营系统钢轨探伤工的培训、考核依据。

**铁道部工务局**  
**铁道部教育司**

# 目 录

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| <b>第一章 无损检测概述</b> .....       | 1   |
| 第一节 无损检测简介.....               | 1   |
| 第二节 无损探伤方法.....               | 3   |
| 第三节 超声探伤概况.....               | 8   |
| <b>第二章 超声波探伤的物理基础</b> .....   | 13  |
| 第一节 超声波的一般概念 .....            | 13  |
| 第二节 超声场 .....                 | 19  |
| 第三节 超声波在异质界面上的反射和透射 .....     | 26  |
| 第四节 超声波的散射、绕射和衰减.....         | 36  |
| 第五节 远场中规则反射体的反射规律 .....       | 39  |
| <b>第三章 超声波探伤仪、探头及试块</b> ..... | 48  |
| 第一节 超声波探伤仪 .....              | 48  |
| 第二节 超声波探头 .....               | 59  |
| 第三节 试 块 .....                 | 65  |
| 第四节 仪器和探头性能指标的测试 .....        | 78  |
| <b>第四章 超声波探伤技术</b> .....      | 89  |
| 第一节 超声波探伤方法 .....             | 89  |
| 第二节 超声波探伤要求 .....             | 95  |
| 第三节 影响缺陷波高的因素.....            | 103 |
| 第四节 缺陷的测定.....                | 108 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| <b>第五章 钢轨、钢轨焊接及其伤损</b> .....  | 120 |
| 第一节 钢轨和钢轨伤损.....              | 120 |
| 第二节 钢轨焊接及焊缝缺陷.....            | 138 |
| 第三节 钢轨伤损分类、标准及其他 .....        | 143 |
| <b>第六章 钢轨探伤仪的特点和使用</b> .....  | 151 |
| 第一节 钢轨探伤仪的主要特点.....           | 151 |
| 第二节 钢轨探伤仪的操作使用.....           | 155 |
| 第三节 仪器和探头的性能测试.....           | 165 |
| <b>第七章 钢轨探伤方法</b> .....       | 175 |
| 第一节 70°探头的探伤 .....            | 175 |
| 第二节 37°探头的探伤 .....            | 200 |
| 第三节 0°探头的探伤 .....             | 214 |
| 第四节 螺孔小角度裂纹的探测.....           | 224 |
| <b>第八章 钢轨焊缝的探伤方法</b> .....    | 233 |
| 第一节 焊缝的轨头、轨腰、轨底探伤.....        | 233 |
| 第二节 气压焊焊缝的全断面探伤.....          | 245 |
| <b>第九章 钢轨手工检查和探伤车</b> .....   | 259 |
| 第一节 手工检查方法.....               | 259 |
| 第二节 钢轨探伤车.....                | 265 |
| <b>第十章 钢轨探伤仪电路原理及检修</b> ..... | 276 |
| 第一节 电工基础知识.....               | 276 |
| 第二节 仪器电路原理.....               | 299 |
| 第三节 故障检查检修.....               | 311 |
| <b>第十一章 钢轨探伤管理</b> .....      | 335 |
| 第一节 组织计划管理.....               | 335 |
| 第二节 作业技术管理.....               | 339 |
| 第三节 设备、质量管理 .....             | 343 |

# 第一章 无损检测概述

## 第一节 无损检测简介

### 一、无损检测的定义

无损检测是一门综合性的应用科学技术,它是在不改变或不影响被检对象使用性能的前题下,检验和分析材料、零件和构件的一种非破坏检测方法。

### 二、无损检测的作用

无损检查是提高产品质量,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:

(一)无损探伤——对产品质量作出评价。无论是铸件、锻件、焊接件、钣金件或机加工件以至非金属结构都能应用无损检测技术探测它的表面或内部缺陷,并进行定位定量分析。

(二)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。

(三)几何度量——产品的几何尺寸、涂层和镀层厚度;表面腐蚀状态;硬化层深度和应力密度状态都能用无损检测技术测定。根据测定结果利用断裂理论确定是否进行修补和报废处理,对产品进行寿命评定。

(四)现场监控——对在役设备或生产中的产品进行现场或动态的检测,将产品中的缺陷变化信息连续的提供给运

行和生产部门实行监控。在高温、高压、高速或高负载的运行条件下尤其需要无损检测。例如压力容器和钢轨的探伤等。

### 三、无损检测的特点

(一)不破坏被检对象。

(二)可实现 100%的检验。

(三)发现缺陷并作出评价,从而评定被检对象的质量。

(四)可对缺陷形成原因及发展规律作出判断,以促进有关部门改进生产工艺和产品质量。

(五)对关键部件和关键部位在运行中作定期检查,甚至长期监控,以保证运行安全,防止事故发生。

### 四、无损检测的发展

从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)尤其对航空、航天、核电、能源、交通、石油和化工等方面的机械产品,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高的综合



分析能力。

## 第二节 无损探伤方法

### 一、无损探伤与无损检测

无损探伤是无损检测的一个重要组成部分。它是对材料、工件或组件进行非破坏性检测和分析的一种方法,以发现材料等组织中不连续状况即裂纹、夹杂、气孔等几何缺陷为主要目的的检验。随着无损检测技术的发展,除五种常规探伤方法外,还有激光全息照相,红外线无损检测、声振检测、微波检测和电磁——超声检测等方法,使无损探伤在无损检测技术中起到主导作用。

### 二、无损探伤方法简介

无损探伤方法种类很多,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、 $\gamma$ 和中子等射线能透过工件和缺陷时对射线衰减不同的特性,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,因工件的材料结构或缺陷的存在,使透过工件的射线强度发生不均匀

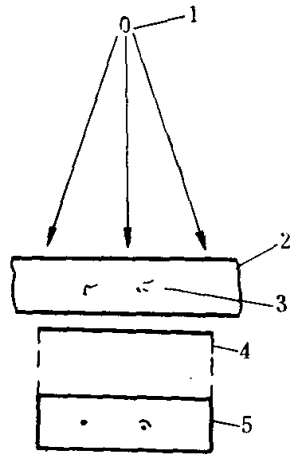


图 1-1 射线探伤原理

1—射线源;2—工件;  
3—缺陷;4—嵌有胶片的暗盒;  
5—暗室处理后的底片及缺陷显示。

变化。这些变化经照相底片感光和显影处理后,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、夹渣、缩孔、疏松等,对片状缺陷检出较难。

### (二)磁粉探伤(MT)

磁粉探伤是将磁铁材料直接通以电流或置于磁场之中,使其磁化。根据在一定条件下缺陷处发生漏磁,漏磁场将吸引磁粉,从而显示缺陷存在的方法。(图 1-2)

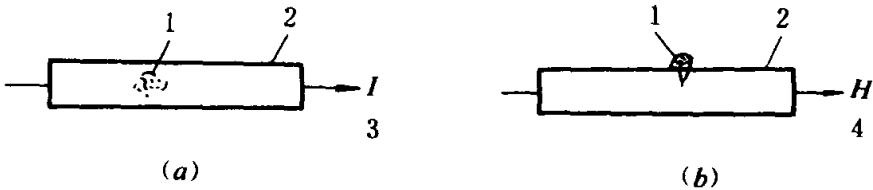


图 1-2 磁粉探伤原理

(a)工件通以电源;(b)工件处于磁场中。

1—缺陷;2—工件;3—磁化电流;4—磁化磁场。

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。但受到表面光洁度,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二种方法。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液,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液,再涂上一层显象剂,借毛细管吸附作用,使缺陷中的

渗透液吸出。通过色泽对比或紫外线照射激发荧光物质发光，从而将缺陷显示(图 1-3)。

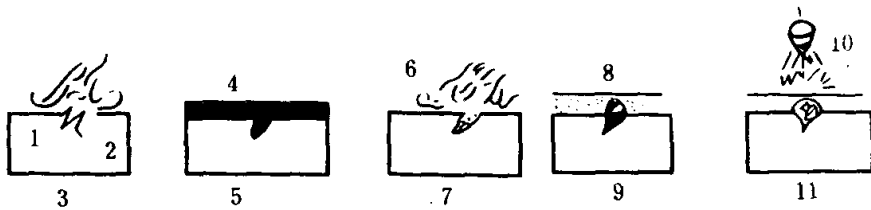


图 1-3 渗透探伤原理

1—油污;2—缺陷;3—预清洗;4—渗透剂;5—渗透;6—清洗剂;7—清洗;  
8—显像剂;9—显像;10—紫外线灯;11—检查。

渗透探伤适用于检测金属和非金属材料表面开口的裂纹、折叠、疏松、针孔等缺陷。能确定缺陷的位置、大小和形状。但难于确定其深度,不适用于探测多孔性材料及材料内部缺陷。

#### (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时,

在工件表面由电磁感应产生涡电流,而感生的漏电流又产生磁场,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

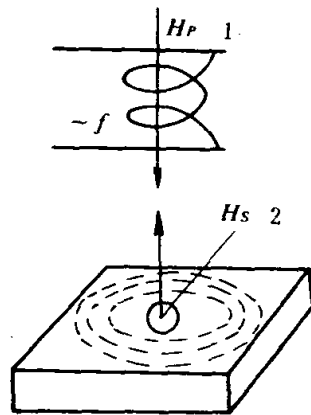


图 1-4 涡流探伤原理

1—线圈磁场;2—涡流。

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。不适用于非导电材料的缺陷检测。

#### (五)超声探伤(UT)

超声波探伤是利用超声波入射被检工件,当声束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缺陷的存在,缺陷的位置和大小。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。

### 三、五种探伤方法的比较

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、射线比超声优越。而工件厚度较大的内部缺陷检测,超声又优于射线。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

| 探伤方法<br>比较内容 | 射线   | 超声  | 磁粉  | 涡流                                       | 渗透   |
|--------------|--|---|---|--|--|
| 典型应用         | 铸件, 焊件                                     | 铸, 锻焊件<br>板材  | 铸, 锻, 焊<br>及冲压件<br>等                                  | 棒, 线, 管材各<br>种工件                         | 各种工件                                       |
| 探出缺陷         | 表面及内<br>部缺陷                                | 表面及内<br>部缺陷   | 表面及近<br>表面缺陷  | 表面及近表面<br>缺陷                             | 表面缺陷                                       |
| 判伤方法         | 由照相底<br>片或荧光<br>屏观察                        | 根据回波<br>信号分析  | 根据磁痕<br>直接观察  | 仪表指标报警                                   | 根据显示直<br>接观察                               |
| 探伤灵敏度        | 1.25%                                      | 灵敏度高  | 可发现 $7\mu$<br>以上裂纹                                    | 可发现深 $20\mu$<br>以上裂纹                     | 稍低于磁粉                                      |
| 主要设备         | X 光机, $\gamma$<br>射线源及<br>其装置              | 超声波探<br>伤仪  | 磁粉探伤<br>器   | 涡流探伤仪                                    | 紫外线灯(荧<br>光用)                              |
| 优点           | 不受工件<br>形状限制,<br>能保存永<br>久记录缺<br>陷直观       | 适用范围<br>广泛使用<br>灵活, 费<br>用低廉, 适<br>用性强                              | 缺陷直观,<br>速度快, 操<br>作方便, 设<br>备简单费<br>用低廉              | 速度快, 操作方<br>便, 设备轻便,<br>费用低廉, 可实<br>现自动化 | 不受工件限<br>制不需专门<br>设备操作简<br>易费用低廉           |
| 缺点           | 费用高, 设<br>备笨重, 工<br>件厚度受<br>限制, 对人<br>体有伤害 | 工件表面<br>要求高, 受<br>工件形状<br>限制缺陷<br>不直观, 定<br>量, 定性受<br>限制, 无永<br>久记录 | 不能探测<br>非磁性材<br>料, 不能发<br>现内部缺<br>陷, 难于确<br>定缺陷深<br>度 | 缺陷不直观有<br>边缘效应, 对点<br>状缺陷不敏感             | 只能发现露<br>出表面的缺<br>陷, 紫外线和<br>某些溶剂对<br>人体有害 |

### 第三节 超声探伤概况

#### 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延袭。

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年德国研制了穿透法探伤仪后,美国、英国相继制成脉反射式探伤仪,法国利用声脉反射原理研制出声纳设备,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,对超声全息回波频谱的分析、焊缝缺陷的评估、数字式探伤仪和成象技术都有了突破性发展。

我国从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中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扫描成象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粘结材料的探测,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,记录和贮存检测数据取得了显著进展,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,是所有无损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、正确的对缺陷定位。随着成象技术的发展,缺陷的定位、定量更加正确和直观。

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它方法快,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. 探测表面要求制备。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具有良好的耦合。通常随着耦合的良好,透入声能随之增加,缺陷检出率越高,因此探测表面的制备是提高探伤质量的重要前题。

3. 受工件形状、晶粒和组织不均匀性的限止。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,其晶体尺寸与超声波长接近,增加探伤难度。

4. 定量精度差。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际缺陷大小均有一定的误差。

### 三、我国钢轨超声探伤的发展

1954年10月铁道部率先引进瑞士MATISA公司生产的以声响指示的共振式探伤仪用于钢轨探伤,这是我国应用超声探伤技术的开端。随之国内有关院、所开始致力于超声探伤仪的研制和探伤方法的探索。在超声探伤技术发展中,钢轨探伤仪的生产也得到同步发展,1957年北京BC 13和武汉GTS—1手杖式钢轨探伤仪问世。1969年初上海无线电22厂技术人员研制了首台A型显示脉冲反射式钢轨探伤仪(JGT—1型),使我国钢轨超声波探伤跃上了新的台阶。

JGT—1型只有一条基线,配有前后 $37^\circ$ 和一只内发 $70^\circ$ 探,随着电子技术发展和钢轨探伤的需要,于1972年又生产了具有二个通道四个探头(内发 $70^\circ$ 、 $0^\circ$ 和两只 $45^\circ$ )反射、穿透兼用的JGT—2型。1980年初铁道部工务局首次在上海召开JGT—3型方案讨论会,经过三年的努力,原上海超声波仪器厂生产的JGT—3型通过鉴定。该仪器具有四个通道,五个探



头同时工作和多种组合形式的功能。为我国现有钢轨探伤仪的发展奠定了基础。在改革开放形势的推动下,1991年的JGT-5型、GT-1型、CGT-6型相继进入市场,多家生产,相互竞争,促进了钢轨超声波探伤仪的发展。铁道部根据钢轨探伤仪的发展趋势,于1993年颁发《多通道A型显示钢轨超声波探伤仪技术条件》使我国钢轨超声波探伤纳入了标准化轨道。

纵观我国钢轨超声波探伤的技术发展,大体经历了电子管——晶体管——集成化,即调频连续波——单通道脉冲反射波——多通道、多功能的脉冲波的三个阶段。目前又有了新的发展,主要表现以下两个方面:

(一)标志着第三代产品的BJGT-6型有了新的突破,以原有的五个通道发展成六通道,其中隐含的第六通道为前 $37^{\circ}+0^{\circ}$ 组合探头中 $0^{\circ}$ 占用,通过 $0^{\circ}$ 与 $37^{\circ}$ 相关法,加强对螺孔上裂的检测。增加小角度探头解决 $37^{\circ}$ 探头难于发现的螺孔小角度裂纹探测。其中BJGT-6型利用计算机和传感技术,自动识别伤损信号,加强对探测速度的控制,更有利于提高钢轨探伤的检测质量。

(二)钢轨探伤车的引进、使我国超声波钢轨探伤向着高速、自动化迈进。自1989年北京铁路局从澳大利亚引进首台钢轨探伤车以后,于1992年又从美国PJT公司引进了5台RTS-1000型探伤车,随着探伤车的使用和普及,我国钢轨超声探伤的设备和技术必将呈现新的面貌。

## 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