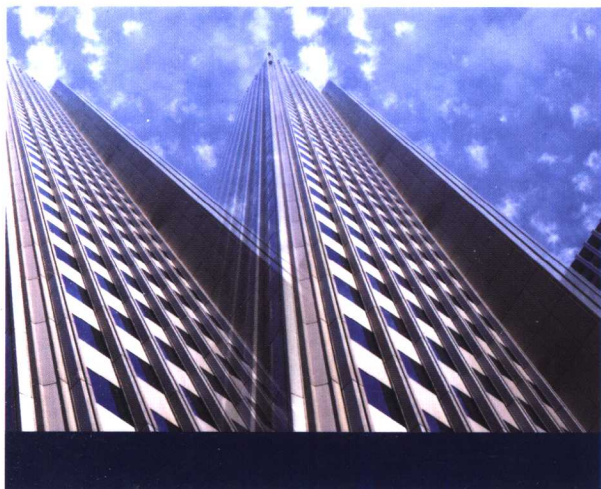


周克印 周在杞 姚恩涛 马德志 编著

建筑工程结构 无损检测技术



CHEMICAL INDUSTRY PRESS



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

TU317

14

建筑工程结构无损检测技术

周克印 周在杞 姚恩涛 马德志 编著



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

建筑工程结构无损检测技术/周克印等编著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 3

ISBN 7-5025-8366-1

I. 建… II. 周… III. 建筑结构-无损检测 IV. TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 017231 号

建筑工程结构无损检测技术

周克印 周在杞 姚恩涛 马德志 编著

责任编辑: 邢 涛

文字编辑: 李玉峰

责任校对: 于志岩

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行

材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 10 字数 267 千字

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8366-1

定 价: 25.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

建筑工程质量是百年大计。建筑工程质量一旦出现问题，轻则劳民伤财，造成极大的浪费；重则伤及无辜，造成严重的后果。因此，提高建筑工程质量，既是建设节约社会的需要，更是建设和谐社会需要。

无损检测技术是建筑工程质量控制的重要手段。无损检测技术是一门以物理学、材料科学、变形固体力学、电子学等为基础，在不改变被检测对象的前提下，探测和评价被测对象的性能的综合应用技术。不改变被测对象原有的结构形式，不影响其使用是无损检测技术最显著的特点。这一特点，使得无损检测技术在许多行业 and 部门得到了广泛的应用，同时也在土木工程结构的质量检查方面发挥了极大的作用。

中外大量的工程实践说明，合理地安排无损检测工作，科学地实施无损检测工作，可以及时发现建筑工程中的质量问题，为采取相应措施提供可靠的依据，避免严重后果的出现。为了适应我国社会主义建设事业飞速发展的需要，我国建筑工程无损检测工作近年来得到了高度重视，新技术、新方法的应用越来越多，一批标准和规程得到了有力的宣传和执行，使得无损检测工作在建筑工程领域产生了极大的效益。

工程实践也说明，目前还有较多的建筑设计、施工、监理、检测、管理人员对无损检测工作的了解和理解不够，没有充分发挥无损检测工作的作用。“让更多的建筑工程技术人员更全面地了解 and 掌握无损检测技术，更好地发挥无损检测工作的作用”是本书的写作宗旨，也是编著者的美好心愿。

在本书的写作过程中，一批无损检测和土木工程领域的前辈、专家给予了大量的指导和教诲，在此深表感谢。同济大学林维正教

授、煤炭无损检测中心郁振炜主任工程师在百忙中仔细审阅了全书并提出了大量具体的修改意见，编著者深表感谢。本书参考了国内外一批优秀书刊、论文、标准和规程，在此对有关作者谨表谢意。同时，编著者还要感谢所在单位给予的关心和支持。

由于编著者水平有限，书中不妥之处，恳请读者批评指正。

周克印 等

2005 年 12 月于南京航空航天大学东华湖畔

内 容 提 要

本书共分七章，较为全面系统地介绍了建筑工程结构的无损检测的主要技术，包括超声波检测、射线检测、漏磁检测、红外检测和微波检测等。介绍了主要方法的物理基础、检测原理，分析了主要检测技术的影响因素，讨论了检测过程的方案确定、质量控制、缺陷评判及技术进展等问题。

本书面向建筑工程质量技术人员，可作为建筑设计、施工、监理、检测、管理人员的参考用书，也可作为高校相关专业师生的教材或参考书。

目 录

第一章 超声无损检测的物理基础	1
第一节 声波的基本概念	1
一、振动与波	1
二、超声波的传播	3
三、超声场的特征值	15
第二节 超声波垂直入射大平界面上的反射与透射	19
一、超声波垂直入射单一的平面界面	19
二、超声波垂直入射多层平界面	24
第三节 超声波的倾斜入射	28
第四节 弯曲界面的影响	31
第五节 超声场分析	33
一、均匀介质中的超声场	33
二、超声波的衰减	36
三、几种规则异质物体对超声波传播的作用	38
第二章 超声无损检测系统	45
第一节 超声换能器	45
一、压电效应与压电材料	45
二、压电晶体的主要性能参数	46
三、常用探头的基本构造	49
第二节 超声波探伤仪	50
一、超声波探伤仪的种类及特点	51
二、超声波探伤仪的工作原理	51
三、数字式超声波探伤仪简介	54
第三节 超声波探伤用试块	59
第四节 超声探测系统的主要指标及其测定方法	63
一、斜探头的主要性能指标	63
二、超声波检测仪器的主要性能指标	66

三、测试系统的组合性能指标	69
第三章 建筑钢结构的超声波检测	72
第一节 钢结构常用材料和焊接接头的主要缺陷	75
第二节 钢结构母材的超声波探伤	84
第三节 钢板连接焊缝的超声波探伤	87
一、钢板全熔透连接焊缝的主要形式	87
二、钢板连接焊缝的超声波探伤	91
第四节 钢网架焊接球节点的超声波探伤	120
第五节 T形焊接接头的检测	132
第六节 钢管相贯节点焊缝的超声波探伤	135
一、钢管相贯节点的主要形式	135
二、T、K、Y管节点焊缝特点	136
三、T、K、Y管分支节点焊缝探伤难点	137
四、相贯线焊缝超声波探伤声程修正	137
第四章 电磁无损检测的物理基础	144
第一节 射线检测	144
一、X射线和 γ 射线	144
二、射线的产生	146
三、射线与物质的作用	150
四、射线的探测	152
第二节 漏磁检测	156
一、材料的磁学性能	157
二、泄漏磁场的产生	159
三、泄漏磁场的探测	161
第三节 红外检测	162
一、红外辐射基本定律	163
二、构件内部缺陷对表面温度场的影响	167
第四节 微波检测	169
一、微波概述	169
二、微波检测的特点	171
三、微波在均匀介质中的传播	172
四、介质变化对微波传播的影响	177
五、微波检测系统的构成	180

第五章 焊接结构的射线和磁粉检测	184
第一节 射线照相检测技术	184
一、对比度	184
二、清晰度	185
三、灵敏度	189
四、增感	191
五、曝光曲线	193
第二节 焊缝射线检测技术	196
一、平板对接焊缝结构的检测	196
二、环焊缝的检测	198
三、T形接头、角接头和搭接接头的检测	203
四、缺陷的判读与构件的质量分级	204
第三节 磁粉检测技术	208
一、构件的磁化	208
二、磁化方法	209
三、试片与试块	213
四、磁粉的使用	214
五、退磁	215
第四节 焊接结构磁粉检测技术	215
一、焊接结构磁粉检测的特点	215
二、常用磁化方法	216
三、磁痕的判读	220
第六章 混凝土结构无损检测	222
第一节 概述	222
第二节 混凝土强度的超声测试技术	223
一、混凝土对超声波传播的影响	223
二、测试系统	225
三、混凝土强度的测定	229
四、影响因素分析及修正	231
第三节 回弹法在混凝土强度测试中的应用	234
一、混凝土强度的回弹测试法	234
二、混凝土构件强度的超声回弹综合测试法	244
第四节 混凝土构件内部状态的超声测试技术	248

一、混凝土构件内部状态的超声测试原理	248
二、主要状态特征的测试	249
第七章 工程结构无损检测新技术简介	265
第一节 探地雷达检测技术	265
一、探地雷达的工作原理	266
二、电磁波传播速度的测试	270
三、主要探测参数	271
四、主要目标探测	274
第二节 红外热成像检测技术	281
一、建筑外饰物的质量检测	281
二、建筑物节能检测	283
三、建筑物红外测试中的几个问题	285
第三节 钢丝绳检测技术	291
第四节 声发射技术及应用	296
一、声发射测试系统的构成	297
二、主要声发射分析参数	298
三、混凝土构件不同阶段的声发射特征	300
四、声发射的定位	301
参考文献	305

第一章 超声无损检测的物理基础

第一节 声波的基本概念

一、振动与波

振动是物质的一种基本运动状态。物体或质点在某一平衡位置附近作往复运动，这种运动状态就叫做机械振动，简称振动。如果物体或质点做周期性直线振动，它离开平衡位置的距离与时间的关系可以用正弦或余弦函数表示，就称为简谐振动。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，这些振动都是较为复杂的振动，但它们的基础是简谐振动，复杂振动可以通过傅里叶分析的方法分解为多个简谐振动。所以在无损检测中，进行有关振动的分析时，常用作简谐振动的弹簧振子 Q 作为基本分析模型。弹簧振子 Q 受力振动后，振子 Q 离开平衡位置的位移量 y 随时间 t 的变化规律可由下列余弦函数（或正弦函数）描述：

$$y = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) \quad (1-1a)$$

或：

$$y = A \cos(\omega t + \varphi) = A \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{T}\right) \quad (1-1b)$$

式中， y 为 t 时刻质点（即振子 Q）离开平衡位置的距离； A 为振幅，表示振子 Q 在振动过程中的最大位移量； T 为周期，它是振子 Q 在其平衡位置附近完成一次振动所需要的时间； $f = \frac{1}{T}$ 为频率，它表示单位时间内振子 Q 的振动次数，频率的单位是“赫兹（Hz）”，也简称为“赫”，1 赫（Hz）表示每秒振动一次，在超

声波分析中常用“千赫 (kHz)”和“兆赫 (MHz)”两个单位, 1 兆赫 (MHz) = 10^6 Hz; $\omega t + \varphi$ 为相位角, 它表示振子 Q 在振动过程中的某一瞬间 (t 时刻) 所处的位置, φ 是在 $t=0$ 这一时刻的相位角, 称为初始相位, ω 为圆频率, 表示在 2π 秒内的振动周期数, 且有 $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ 。振幅 A 、周期 T 、频率 f 和相位 $\omega t + \varphi$ 是描述简谐振动的基木物理参数。这些参数对分析声学无损检测过程具有重要的作用。

波动是振动在物体或空间中的传播, 波动是振动的结果, 是物质的基本运动形式之一。波动可分为两大类, 一类是机械波, 另一类是电磁波。其中机械波是机械振动在弹性介质中引起的波动过程, 例如水波、可闻声波、超声波等。电磁波是电磁振动所产生的变化电场和变化磁场在物体中或空间中的传播过程, 如无线电波、红外线、微波、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线等。这两种波是无损检测中重要的检测媒介。有关电磁波的问题在本书第三章再进行讨论。

机械波是机械振动系统产生的, 机械波的产生除了需要振动波源外, 还必须有合适的传播介质。机械波的传播仅是振动状态和振动能量的传输, 振动质点仅将振动能量传递给相邻质点, 使得该质点在其平衡位置附近来回振动, 但质点本身并不随波动前进。波动传播过程中会产生干涉、衍射等现象, 在不均匀的介质中也会产生反射、折射、绕射等现象。

声学无损检测的对象大都是固体构件。尽管固体构件有金属件和非金属件之分, 但都可以看成弹性介质, 也即组成这些构件的物质内部的质点相互间由弹性力联系着。除此以外, 自然界中的液体和气体大多数也属于弹性介质。为便于分析, 我们可以把弹性介质看成是相互间用小弹簧 (弹性力) 联系着的质点所组成。在外力作用下, 这种介质中任何一个质点离开了平衡位置, 弹性力总要使该点恢复到平衡位置, 同时它又会引起相邻质点的位移。以此类推, 只要初始振动能量足够大, 质点通过相互间的弹性联系, 就可将振

动能量传输到足够远处，这就是波动过程。

声波的这种可以在弹性介质中远距离传播的性能早为人们所掌握，并充分地应用于构件无损检测中。声波的频率范围较广。声波可以按其频率分为次声波、可闻声波、超声波和特超声波四类。次声波的频率在 20Hz 以下，人耳听不到，但对人体伤害极大；可闻声波的频率在 20Hz~20kHz 之间，人耳可以听到；超声波的频率在 20kHz~ 10^3 MHz 之间；特超声波的频率在 1000MHz 以上，超声波和特超声波人耳都听不到。超声波探伤常用的频率为 0.25~15MHz，其中金属材料构件超声波探伤常用频率为 0.5~10MHz，其波长约为 10~0.5mm。

由于超声波频率比可闻声波高得多，波长较短，超声波在构件中传播时具有某些与光波类似的特性，有时可以借用光学原理来研究和解释超声波的物理现象。

在声学无损检测中，超声波检测用途最广。这主要是因为超声波具有以下几个特性：①束射特性，这是因为超声波波长较短，声束指向较好，可以使超声能量向一个确定的方向集中辐射，便于缺陷定位；②反射特性，超声波在弹性介质中传播时，遇到异质界面时会产生反射、透射或折射，这些现象主要由入射角度和不同介质的声学特性决定，利用超声波的这一性质，可以确定构件中缺陷的有无及其性质；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，其声压和声强远大于可闻声波，使得超声检测具有很大的可检测范围；④波型转换特性，超声波在异质界面上容易实现波型转换，构件检测中所需要的各种波型（包括纵波、横波、板波、表面波等）都可以通过压电晶片形成的纵波产生。

二、超声波的传播

1. 超声波的波型

按介质质点的振动方向与波的传播方向间的关系，可以将超声波分为不同的类型。

(1) 纵波 L 质点振动方向与波动传播方向相同的波型称为纵

波。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的疏密变化，形成纵波，如图 1-1 所示。纵波也被形象地称为“压缩波”或“疏密波”，英文为“longitudinal wave”，故常用符号 L 表示。

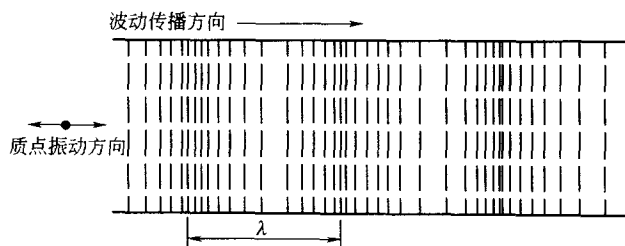


图 1-1 介质中纵波的传播

纵波因介质质点所受的交变拉压应力作用而产生，所以凡是能发生拉伸或压缩变形的介质都能够传播纵波。固体能够产生拉伸和压缩变形，故纵波能够在固体中传播。液体和气体虽然不能承受拉应力，但在压应力作用下能产生相应的体积变化，因此，纵波也能在液体和气体中传播。

(2) 横波 S 质点振动方向与波动传播方向相互垂直的波型称为横波。当固体弹性介质受到交变的剪切应力作用时，产生剪切变形，介质质点就会产生相应的横向振动，质点的振动方向与波动的传播方向垂直，这种波型称为横波，也称为剪切波，英文为“transverse wave”，但用符号 S 表示，如图 1-2 所示。事

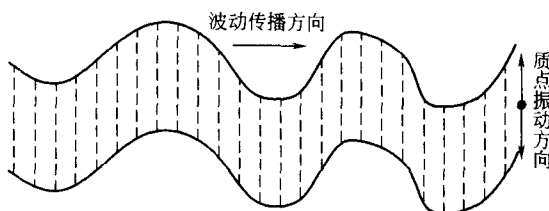


图 1-2 固体介质中横波的传播

实上, 图 1-2 仅是一种横波, 此时波在纸面内水平方向传播, 介质质点也在该平面内作上下振动, 称为垂直偏振横波, 用 SV 表示; 如果波的传播方向仍为水平向右, 但介质质点作垂直于纸面的前后振动, 也形成横波, 称为水平偏振横波, 用 SH 表示。

在横波的作用下, 介质内发生剪切变形。因此, 只有能够产生剪切弹性变形的介质才能传播横波。固态弹性介质能够承受剪切弹性力并产生相应的剪切弹性变形, 而液态和气态介质中相邻区域间只能形成自由滑动, 不具有剪切弹性模量。所以, 横波只能在固态弹性介质中传播, 横波和其他具有横向振动分量的波型不能在液态和气态介质中传播。

(3) 表面波 固体介质表面在交替变化的应力作用下, 质点产生纵横向复合振动。这种质点振动所引起的波动传播只在距固体介质表面很小的范围内进行, 故称表面波。1887 年科学家瑞利 (Rayleigh) 首先提出了表面波的问题, 因此也常将表面波称为瑞利波 (Rayleigh wave), 用符号 R 表示。

当固态介质的厚度大于波长时, 在一定条件下, 在固体介质与气体介质的交界面上就产生表面波。在表面波作用下, 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 1-3 所示。也就是说, 表面的某一质点既有 x 方向的位移, 又有 y 方向的位移。因此, 表面波可视为纵波 L 和垂直偏振横波 SV 的合成。质点振幅的大小

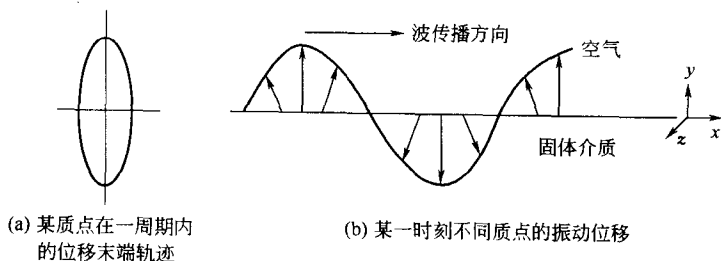


图 1-3 介质中的瑞利波

与材料的弹性性质及瑞利波的传播深度有关，在固体介质中距表面 $\frac{\lambda}{4}$ 的地方振幅最强，但超出此深度后振幅又随着深度的增加而迅速减小。当瑞利波传播的深度接近一个波长时，质点的振幅已经很小了。所以表面波无损检测通常只能检测距构件表面两倍波长深度以内的缺陷。但在有效检测区域内，表面波对表面损伤非常敏感，检测效率也很高。

在构件中有大量的倒角、凸台、孔边等结构细节。瑞利波在传播途中遇到这些结构细节的棱边时，若棱边曲率半径大于5倍波长，表面波的传播不受影响。当棱边曲率半径小于此尺度时，部分表面波能量被棱边反射；小于波长时，反射能量很大。在超声波探伤中利用这种反射特性来检测工件表面和近表面的缺陷，以及测定表面裂纹深度等。

(4) 板波 在板状且厚度与波长相当的弹性固体中，传播的声波是有别于表面波的另外类型的波，称为板波。在板波传播过程中，质点的振动遍及整个板厚。兰姆波是板波的主要形式。兰姆波沿着板的两个表面和中部传播，按板中振动波节的形式可分为对称型（S型）和非对称型（A型）两种，如图1-4(a)、(b)所示。对称型兰姆波使得板的中心区域作平行于波的传播方向的振动，上下表面作椭圆振动，且振动相对于中心区域反对称。非对称型兰姆波使得板的中心区域作横向振动，上下表面做相位相同的椭圆振动。在无损检测实践中，板波主要用于探测薄板状构件内的缺陷，如探测薄壁管内的分层、裂纹等缺陷，检查复合材料的层间结合状况等。

2. 超声波的传播速度

超声波的传播速度就是波动在单位时间内的传播距离，也称声速。声速与传播介质的密度和弹性模量有关。不同波型的声速不相同。下面分几种情况具体讨论。

(1) 无限大固体介质中的声速 当介质尺寸远远大于超声波波长时，该传播介质就可以看成是无限大介质。固态无限大弹性介质

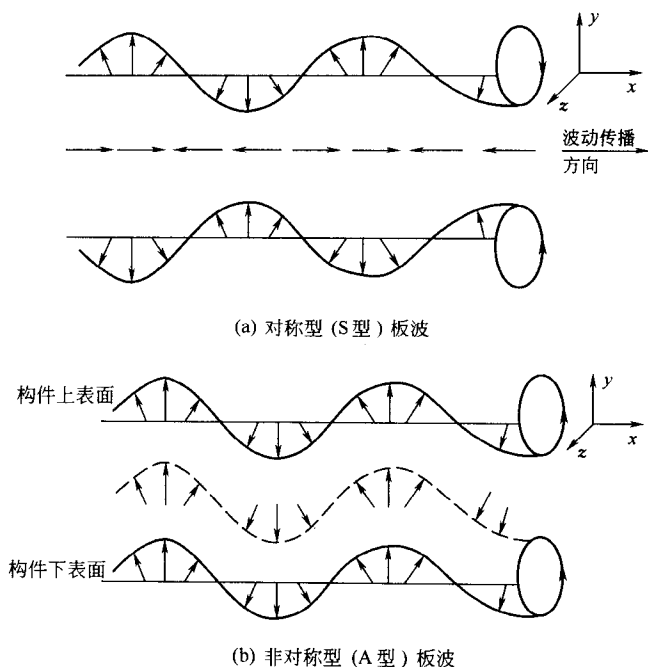


图 1-4 介质中的板波

中的纵波声速可用下列公式表示：

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \times \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1-2)$$

式中， E 为介质的弹性模量； ρ 为介质密度； μ 为介质的泊松比。

固体无限大弹性介质中的横波声速可用下列公式表示：

$$c_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \times \sqrt{\frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (1-3)$$

式中， G 为介质的剪切弹性模量。

固体无限大弹性介质中的表面波（瑞利波）的声速可用下列公