

学校编码 : 10384

分类号 : _____ 密级 : _____

学 号 : 200036005

UDC : _____

学 位 论 文

骨性质的定量超声波表征系统的建立与研究

Construction and Investigation of the Bone Quantitative Ultrasonic Detection System

江 洋

指 导 教 师 : 冯祖德 教授

申请学位级别 : 硕 士

专 业 名 称 : 高分子化学与物理

论文提交日期 : 2003 年 11 月

论文答辩时间 : 2003 年 11 月

学位授予单位 : 厦 门 大 学

学位授予日期 :

答辩委员会主席 : 林昌健 教授

评阅人 : 林昌健 教授 翁 端 教授

**Construction and Investigation of the Bone Quantitative
Ultrasonic Detection System**



A Thesis Presented for the Degree of Master of Science at
Xiamen University

by

JIANG Yang

Directed by Prof. FENG Zude

Department of Materials Science and Engineering
College of Chemistry and Chemical Engineering

Xiamen University

Xiamen, 361005

Nov 2003

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

目 录

中文摘要.....	
英文摘要.....	
第一章 前言.....	1
1.1 骨与骨质疏松.....	1
1.1.1 骨质疏松及其危害.....	1
1.1.2 骨的结构和组成.....	2
1.2 运用超声手段测量骨的性能.....	5
1.2.1 超声学及其运用.....	5
1.2.2 使用定量超声的方法对骨性能进行测量.....	6
1.2.2.1 不同测量手段对骨骼矿物质密度的测量.....	6
1.2.2.2 使用定量超声方法进行骨性能表征.....	7
1.2.2.3 宽带超声衰减的测量.....	9
1.2.2.4 超声声速的测量.....	10
1.2.2.5 定量骨超声检测面临的挑战.....	10
1.3 超声背散射在骨性能测量中的应用.....	11
1.3.1 超声背散射法进行骨超声检测的原理.....	11
1.3.2 超声背散射系数的测量方法.....	12
1.3.2.1 超声背散射系数测量的实验方法.....	12
1.3.2.1.1 Chaffai 和 Roberjot 的超声背散射系数测量方法.....	12
1.3.2.1.2 Wear 的超声背散射系数测量方法.....	13
1.3.2.1.3 Rho 的表观完整背散射测量方法.....	14
1.3.3 对超声背散射系数的预测方法.....	14
1.3.3.1 超声背散射系数预测的理论基础.....	14
1.3.3.2 预测超声背散射系数的计算方法.....	15
1.4 运用动态热机械分析方法测量骨的动力学性能.....	17
1.4.1 动态热机械分析测量方法及其优点.....	17
1.4.2 动态热机械分析方法的特点.....	20

1.4.3 动态热机械分析在骨材料研究中的应用.....	21
1.5 本文的主要工作及意义.....	21
1.5.1 本文的主要工作内容.....	21
1.5.2 本文的研究意义.....	22
参考文献.....	23
第二章 实验仪器与实验方法.....	29
2.1 主要实验仪器.....	29
2.2 实验方法.....	29
2.2.1 牛骨试样的制备方法.....	29
2.2.1.1 牛皮质骨试样制备方法.....	29
2.2.1.2 牛松质骨试样的制备方法.....	30
2.2.1.3 使用不同条件对牛皮质骨进行处理.....	30
2.2.2 阿基米德法测量牛骨试样密度.....	30
2.2.3 煅烧法测定牛皮质骨矿物质含量.....	31
2.2.4 牛松质骨单向压缩实验.....	31
2.2.5 DSC 测量骨材料热性能.....	32
2.2.6 DMTA 表征骨动态机械性能.....	32
2.2.7 FTIR 对骨成分表征.....	32
参考文献.....	34
第三章 超声波方法的建立.....	35
3.1 超声声速 (Speed of Sound, SOS) 的测量.....	35
3.1.1 超声声速测量计算方法.....	35
3.1.2 系统简介.....	35
3.1.3 使用程序测量超声声速的步骤.....	39
3.1.4 在超声声速测量中可能遇到的问题和解决办法.....	41
3.2 宽带超声衰减 (Broadband Ultrasonic Attenuation, BUA) 的测量.....	43
3.2.1 宽带超声衰减测量计算方法.....	43
3.2.2 用程序测量宽带超声衰减的方法.....	44

3.2.3 在宽带超声衰减测量中可能遇到的问题与解决办法	45
3.3 超声横波声速的测量	45
3.4 接触法超声纵波声速的测量	45
3.5 显示波形功能模块	46
3.6 控制示波器功能模块	46
3.7 本章小结	46
参考文献	47
第四章 LabVIEW 编程进行定量骨超声检测	49
4.1 图形化编程系统 LabVIEW	49
4.1.1 LabVIEW 发展概况	49
4.1.2 LabVIEW 编程简介	51
4.1.2.1 LabVIEW 的工作原理	51
4.1.2.2 G 语言编程	52
4.2 使用程序前对示波器的设置	55
4.3 LabVIEW 编程测定超声声速 (Speed of Sound, SOS)	56
4.3.1 程序流程及解释	56
4.3.2 SOS 控制面板参数解释	60
4.3.3 SOS 参数面板参数解释	64
4.4 LabVIEW 编程测定宽带超声衰减 (Broadband Ultrasonic Attenuation, BUA)	64
4.4.1 程序流程及解释	64
4.4.2 宽带超声衰减控制面板参数解释	68
4.4.3 宽带超声衰减参数面板参数解释	72
4.5 LabVIEW 编程测量物体中横波传播速度	72
4.5.1 程序流程及解释	72
4.5.2 超声横波声速测量控制面板参数解释	73
4.5.3 超声横波声速测量参数面板参数解释	74
4.6 LabVIEW 编程接触法测量物体中纵波传播速度	74
4.6.1 程序流程及解释	74
4.6.2 超声横波声速测量控制面板参数解释	74

4.6.3 接触法超声纵波声速测量参数面板参数解释	74
4.7 查看波形标签页	79
4.8 控制示波器标签页	79
4.9 本章小结	82
参考文献.....	83
第五章 对牛骨性能表征.....	84
5.1 牛骨试样的密度	84
5.1.1 牛皮质骨密度	84
5.1.2 牛松质骨密度	84
5.2 煅烧法测定牛皮质骨矿物质含量.....	84
5.3 骨矿含量对牛皮质骨超声声速和衰减系数的影响.....	85
5.4 牛松质骨单向压缩实验.....	85
5.5 使用本文建立的超声检测模型测量牛松质骨性质.....	86
5.5.1 牛松质骨中超声声速的测量.....	86
5.5.2 牛松质骨中宽带超声衰减系数 (nBUA) 的测量.....	87
5.6 DSC 表征牛皮质骨热性能.....	87
5.7 DMTA 表征骨动态机械性能.....	91
5.7.1 对牛皮质骨的 DMTA 温度扫描	91
5.7.2 对牛骨的 DMTA 频率扫描.....	93
5.8 FTIR 表征牛皮质骨成分信息	93
5.9 本章小结	96
参考文献.....	97
第六章 结论.....	98
致 谢.....	100

骨性质的定量超声波表征系统的建立与研究

摘要

骨作为一种主要的器官,对人体起着支撑作用,同时起到对重要脏器的保护、造血、保护脑和神经通路、承受冲击、贮存矿物质等多种重要功能。因此,保证骨的健康是维护身体健康的基础。另一方面,骨质疏松作为一种多发性公共卫生问题,正日益得到人们的广泛重视。目前,定量骨超声检测作为一种价廉、便携、操作简单、无辐射、精确度高,预测骨折具有高灵敏度的无损检测手段,在发达国家已被广泛应用于临床。

从上世纪 90 年代后期开始,定量骨超声检测在国内开始进入临床应用,虽然以其为基础的临床研究颇为活跃,但是基于其测量原理和测量系统的开发依然起步较晚。目前,国内还没有厂家有能力生产定量骨超声测量仪器。对于此种设备模型的开发,目前仅有清华大学和天津大学对超声声速这一种测量方法进行了研究开发,为一般认为的两种 QUS 参数中的一种。

本文使用 LabVIEW 编程语言结合 Panametrics 5800PR 超声发射接收装置开发出具有超声声速(包括纵波和剪切波)和宽带超声衰减自动测量和数据处理功能的分析系统,并对其测量结果与国外文献报导的结果进行了对比和验证。

除此之外,本文还使用了 DMTA、DSC、FTIR 以及单向压缩等表征手段,对脱矿和脱胶原处理对于牛骨的物理和化学性质影响进行了初步探讨。其中 DMTA 作为一种高分子检测手段,新近才被骨材料研究人员所使用。通过不同测量手段对骨材料性能的表征,可以更进一步加深对骨材料的认识 and 了解。

本文验证了脱矿和脱胶原处理对于牛骨的密度和骨矿物质含量的影响。骨试样脱矿后的骨试样密度小于参比试样,而脱胶原后的试样密度大于参比试样。这说明矿物质质量在牛皮质骨质量中占较大比重。本文测定了不同矿物质含量的骨材料的超声声速和声衰减系数的变化情况。与未处理试样相比,脱矿试样和脱胶原试样声速都有所降低,超声衰减系数都明显增加。

本文进行了松质骨试样的单向压缩实验,得到了松质骨的弹性变形范围。

通过对皮质骨材料的 DSC 和 DMTA 温度扫描结果的分析和对前人论述的研究,对牛

骨的温度扫描中出现的转变温度提出了新的解释。指出牛骨中胶原分解峰是 3 个而不是通常认为的 2 个，并分别对这 3 个转变温度进行了解释。

在不同矿物质含量的牛皮质骨试样的 FTIR 实验中可以看到，随着脱矿和脱胶原试样矿物质含量的变化，胶原组分中的氨基，以及无机相中三处表明羟基磷灰石和碳酸羟基磷灰石存在的特征峰强度发生明显变化。

关键词：定量超声；声速；宽带超声衰减

Construction and Investigation of the Bone Quantitative Ultrasonic Detection System

ABSTRACT

As for a major organ, bone plays an important role in multiple aspects of individual performance. Bones not only sustain the weight of body, but also protect the most important organs, hematopoiesis, secure brain and nervous system, bear outside compact, and maintain mineral materials. Therefore, maintenance bone healthy is the base of keep physical health. On the other hand, as a multiple public health problem, osteoporosis becomes more and more regardful by people. Nowadays, quantitative ultrasonic (QUS) detection is regarding as a useful clinic diagnose method which is performing well in developed countries because of its great advantages such as cheap, portable, easy operation, non-radiation, high degree of accuracy and non-destructive.

From the later years of 1990's, QUS began to be used in clinic area in China. Although its clinical application seems active, the study of QUS is not seemingly since no commercial product was found. As for the equipment phantom, only the investigators in Tsinghua University and Tianjin University performed related works about speed of sound (SOS) that is one of the two basic parameters of QUS. The other parameter is broadband ultrasonic attenuation (BUA).

This thesis develops a QUS system programmed by LabVIEW, a famous visible programming language, combined with a Panametrics 5800PR ultrasonic pulser and receiver system and a Tektronix TDS 220 digital oscilloscope with computer. This system is an analysis equipment which can acquire and save data from SOS (including longitudinal wave and shear wave) and BUA measurement process and dispose the saved data automatically. The results are compared with the works by former investigators.

Moreover, the influences of physical and chemical properties by demineralization and decollagenization upon bone are determined by DMTA, DSC, FTIR, mechanical character testing, etc. Among the testing methods, acting as a polymer method, DMTA is used to determine bone's character only in recent years. We can acquire more understanding and acknowledge about bone's properties by multiple ways.

This study verifies the influence of the treatment of demineralization and decollagenization on the bone's mineral contents and density. The bone specimen's density is lower after

demineralization treatment and higher after decollagenization treatment. These facts indicate that the whole mass of bone is mainly contributed by the mass of mineral contents. The value changes of SOS and ultrasonic attenuation coefficient while mineral content changes are investigated. Compared with untreated specimen, both demineralization and decollagenization's SOS are decreased, but their ultrasonic attenuation coefficients are significantly increased.

The simplex compression test is performed on cancellous bovine bone specimen. The method yields out the elastic range of cancellous bovine bone.

After analyzing the results of DSC and DMTA tests and former discussions, some new viewpoints are proposed about the changing temperatures in thermal spectrum of bovine bone. For example, the peak number of decompose changing temperatures of bovine bone is three rather than usually considered two. The reason of this judgment is illustrated.

FTIR is used to study the differences of bovine bone specimens with different mineral contents. It is clear that the changes of intensities of peaks which belonged to amino in collagen and the peaks belonged to tricalcium phosphate (TCP) and hydroxycarbonate apatite (HCA) were seemingly accordant with the mineral contents change after demineralization and decollagenization.

Key Words: Quantitative Ultrasonic; Speed of Sound; Broadband Ultrasonic Attenuation

第一章 前言

1.1 骨与骨质疏松

骨是生物进化到一定阶段的产物，对生物体发挥着无可替代的作用。成年人约有骨 206 块，占体重的 20%。骨的健康状况对人体健康有着极为重要的影响。骨不但对人体起着支撑作用，同时起到对重要脏器的保护、造血、保护脑和神经通路、承受冲击、贮存矿物质等多种重要功能。因此，保证骨的健康是维护身体健康的基础。

1.1.1 骨质疏松及其危害

骨质疏松是一种主要的公共卫生问题[1,2]。在美国每年有超过一百五十万人由于骨质疏松而发生骨折。每年在美国用于治疗骨质疏松的费用超过 100 亿美元[3]。在我国，1994 年有 8300 万人患有骨质疏松症，预计到 2050 年我国的骨质疏松患者将达到 2.1 亿[4]。

在医学研究领域，超声最早在 20 世纪 60 年代应用于评价骨[5]。近年来，定量超声测定（QUS，USD[6]）作为一种动态力学测量手段被用来进行骨量的测量。由于骨质疏松以骨量减少为特征[7]，因而对骨量进行测量是临床评估骨质疏松风险的手段。骨质疏松按照字面上的解释就是多孔的骨骼，这种骨骼比正常的骨骼酥脆，容易发生骨折。为了弥补饮食中钙质摄入的不足，身体需不断仰赖从骨骼中移出钙来补充，因此造成骨骼多孔的现象。具体表现为成骨细胞造骨速度小于破骨细胞的吞噬速度。1885 年由 Pommer 提出，1993 年第四届国际骨质疏松症研讨会确定骨质疏松症定义为：原发性骨质疏松症是以骨量减少，骨的微观结构退化为特征，使骨的脆性增加以及易于发生骨折的一种全身性骨骼疾病。发生骨质疏松时骨内孔隙变大变多、骨小梁量变小、骨皮质变薄、骨密度变小、单位体积骨骼所含的矿物质量减少。骨质疏松可分为三类：一类为原发性骨质疏松症，它是随着年龄的增长必然发生的一种生理性退行性病变。第二类为继发性骨质疏松症，它是由其他疾病或药物等一些因素所诱发的骨质疏松症。第三类为特发性骨质疏松症，多见于 8~14 岁的青少年或成人，多半有遗传家庭史，女性多于男性。妇女妊娠及哺乳期所发生的骨质疏松也可列入特发性骨质疏松。正常骨骼的代谢过程称为“骨骼再造”（bone remodelling），就是噬骨细胞溶解骨头与生骨细胞填补骨头的这两个过程不断地周而复始地进行，以维持平衡状态。35 岁以上，骨溶解速度逐渐超过骨合成速度，而且随着年龄的增加骨骼的质与量渐减，于是流失过速就形成了骨质疏松症。骨质疏松的临床表现为疼痛；身长缩短、驼背；脊椎、桡骨远端、股骨上段、踝关节骨折以及呼吸系统障碍。产生

骨质疏松的因素通常是由于遗传、种族、性别、运动、激素、年龄老化、饮食营养、其它慢性疾病等多重因素交互影响下的复杂结果。年老的妇女有三分之一罹患脊椎骨骨折。百分之八的妇女在年老时会发生股骨头骨折。我国大约有 50% 的老年妇女，20% 的老年男性患有骨质疏松症[7]。骨质疏松已成为我国乃至世界广泛关注的社会问题，对其诊治有极其迫切的重要性[7]。

1.1.2 骨的结构和组成

骨是一种器官，由骨组织构成，分为骨密质和骨松质。骨密质质地致密，抗压抗扭曲性很强，分布于骨表面。骨松质由相互交织的骨小梁按力的一定方向排列，质地疏松但却体现出既轻便又坚固的性能，符合以最少的原料发挥最大功效的构筑原则。皮质骨是骨组织的主要负重及传递部分。皮质骨的生物力学性能主要是由羟基磷灰石和胶原成份及它们所组成的结构决定的[8]。皮质骨的胶原纤维主要由两部分组成，一种为皮质骨外侧平行排列的胶原纤维，表现为平行消光，另一种为皮质骨内侧以哈氏管为中心环形排列的胶原纤维，表现为轮状消光[8]。骨的微观机构如图 1.1.1[9]所示。

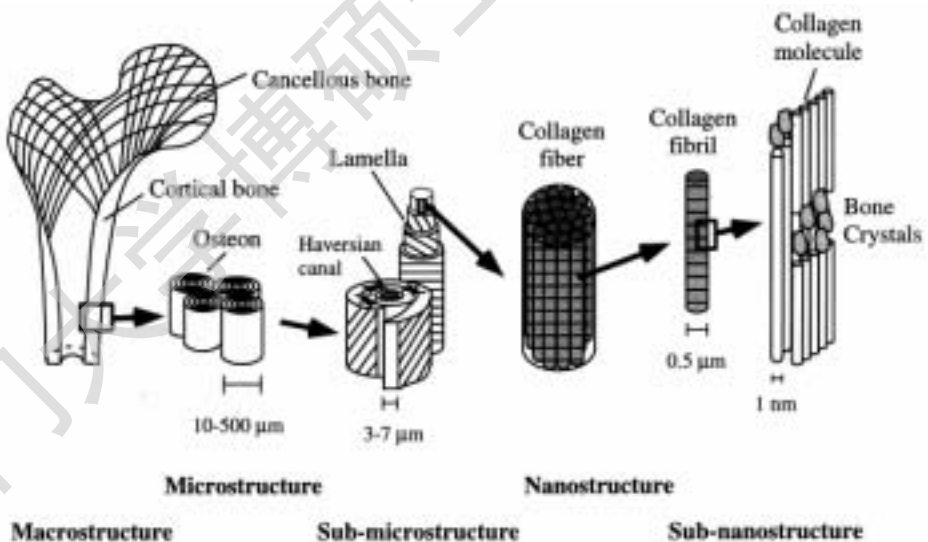


Fig1.1.1 Hierarchical structural organization of bone: (a) cortical and cancellous bone; (b) osteons with Haversian systems; (c) lamellae; (d) collagen fiber assemblies of collagen fibrils; (e) bone mineral crystals, collagen molecules, and non-collagenous proteins.

让我们以腿骨来说明骨的结构。一个完整的腿骨由皮质骨 (Cortical bone) 和松质骨 (Cancellous bone) 组成。在骨的皮质部分，在截面上可以看到直径 $10-500\ \mu\text{m}$ 圈装的结

构。这被称为骨单位 (Osteon)。图 1.1.2 是本文使用光学显微镜拍摄的牛皮质骨骨单位照片。



Fig1.1.2 Osteon photo by optical microscope $\times 100$

骨单位是层状结构,在层状结构的中心是哈佛氏管 (Haversian canal)。层状结构被称为薄层 (Lamella)。每个薄层由相同方向排列的胶原纤维 (Collagen fiber) 组成。但在不同薄层中胶原纤维的排列方向不一样。胶原纤维由更细的下级结构原胶原纤维 (Collagen fibril) 构成。原胶原纤维的节状结构由胶原分子 (Collagen molecule) 与主要成分为羟基磷灰石的骨矿 (Bone crystals) 交替排列所组成。骨的机械强度主要由骨矿提供,而骨的弹性主要由胶原分子提供。按照骨的微观尺度,可以把骨结构分为宏观结构 (Macrostructure)、微观结构 (Microstructure)、亚微观结构 (Sub-microstructure)、纳米结构 (Nanostructure)、亚纳米结构 (Sub-nanostructure),如图 1.1.1 所示。

更为详细的原胶原纤维如图 1.1.3[9]所示。由三螺旋蛋白质组成的胶原分子像栅栏一般成排排列。三螺旋蛋白含有约 33%甘氨酸 (glycine), 12%脯氨酸 (proline) 和 11%丙氨酸 (alanine),以及稀有的 12%羟脯氨酸 (hydroxyproline) 和 1%羟离氨酸 (hydroxylysine) [10]。两排结构间有 67nm 的错位,包含 27nm 的重叠部分和 40nm 的两段胶原分子间的距离。每束胶原分子直径有 1.23nm。

松质骨的多孔结构如图 1.1.4[11]所示。

对静态条件下皮质骨力学性能的研究已经广泛展开,国内外许多学者对人体皮质骨的力学性能作了报导。Hiroshi[12]等对正常人的股骨、肱骨、尺桡骨及跖骨等皮质骨在模拟

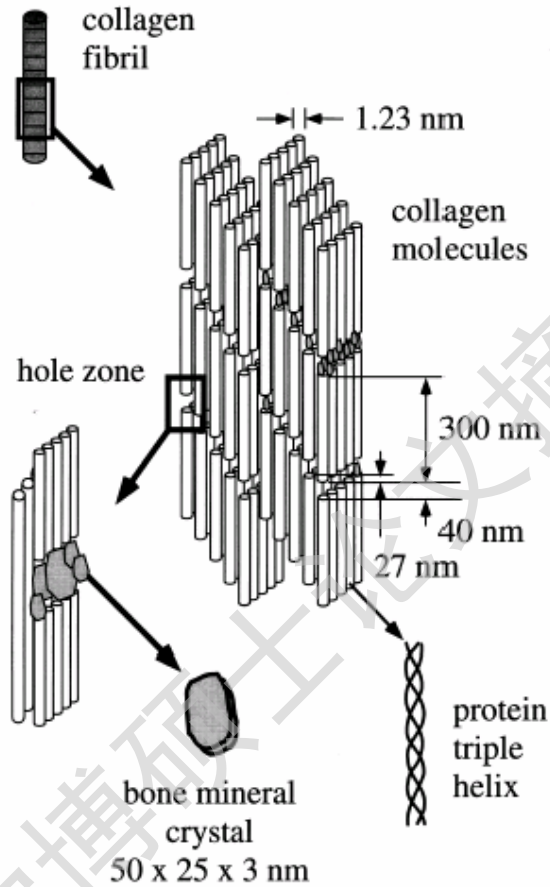


Fig1.1.3 A schematic diagram illustrating the assembly of collagen fibrils and fibers and bone mineral crystals. The well known 67 nm periodic pattern results from the presence of adjacent hole (40 nm) and overlap (27 nm) regions of the assembled molecules.

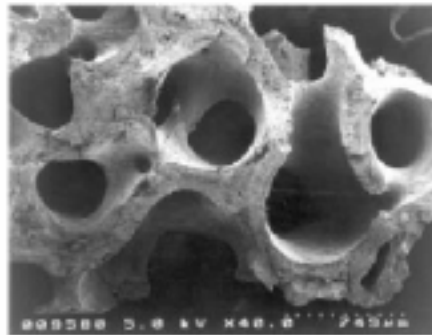


Fig1.1.4 Scanning electron micrograph of a thin section of successfully defatted/hypochlorite-treated bovine bone matrix.

人体负重状态下进行力学测试,发现在股骨干中段的皮质骨抗压性能最强。Richard[13]报道,随年龄的不同皮质骨的力学性能也不同。Choi[14]等从显微结构水平上对皮质骨进行弯曲试验,发现皮质骨与其它骨组织相比其弹性模量最大。国内王以进[15]对长管状骨在骨轴向、 45° 方向及与骨轴垂直的横向的力学性质进行研究,发现其弹性常数各不相同。徐秀林[16]对股骨干中段外侧沿骨轴线和垂直于骨轴线两方向行标本轴向压缩试验,发现皮质骨是一种各向异性的非均质材料。

骨组织由有机质和无机质构成,有机质由骨细胞分泌产生,约占骨重的 $1/3$,其中绝大部分(95%)是胶原纤维,其余基质,即中性或弱酸性的糖胺多糖组成的凝胶。无机质主要是钙盐,约占骨重的 $2/3$,主要成分为羟基磷灰石结晶。由于胶原是骨的组成部分,因此骨表现出一定的粘弹性特性。因此从动力学的角度对骨进行研究是必要而可行的。

1.2 运用超声手段测量骨的性能

1.2.1 超声学及其运用

为了了解超声检测仪器的的工作原理,我们对超声的产生及其特点和应用进行一下初步的了解。

弹性媒质中传播的应力、质点位移、质点速度等量的变化称为声波[17]。从频率范围而言,超声是指频率高于可听声频率范围的声[17]。根据对人耳的统计规律,在声学中,规定可听声的频率上限为 20kHz。因而概括地说,超声是频率高于 20kHz 的声波。其中频率高于 10^8 Hz 的超声称为特超声。研究超声波的产生、传播、接收和效应的科学称为超声学。超声学是声学发展中最为活跃的一部分。

首先我们来对声波的形成进行初步的认识。我们以线性声学的观点,对声波产生的物理过程做如下定性描述。连续弹性媒质可以看作是由许多彼此紧密连接的质点组成。当弹性媒质中的质点受到某种扰动时,此质点便产生偏离其平衡位置的运动,这一运动势必推动与其相邻质点也开始运动。随后,由于媒质的反弹作用,该质点及相邻质点又相继返回其平衡位置。但因质点运动的惯性,它们又在相反方向产生上述过程。如此,媒质中质点相继在各自的平衡位置附近往返运动,便将扰动以波动的形式传播到周围更远的媒质中去,形成声波。

气体和液体由于没有剪切弹性,所以只能传播纵波。由于本课题研究的对象在水中测量,因此只研究超声纵波。当超声波在介质中传播时,它在组织中产生瞬时的压缩和伸张区。当组织中质点的振动方向平行于超声波的传播方向时,超声波的传播模式即为纵波。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库