

木质复合材料的 动态特性与无损检测

胡英成 著

王逢瑚 顾继友 审

东北林业大学出版社

木质复合材料的动态特性 与无损检测

胡英成 著
王逢瑚 顾继友 审

东北林业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

木质复合材料的动态特性与无损检测/胡英成著. —哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2004. 7

ISBN 7-81076-602-3

I. 木… II. 胡… III. ①木材-复合材料-动态特性②木材-复合材料-无损检验 IV. TB 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 064984 号

木质复合材料的动态特性与无损检测

Muzhi Fuhe Cailiao De Dongtai Texing Yu Wusun Jianyan

胡英成 著

王逢瑚 顾继友 审

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路 26 号)

黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂印装

开本 850 × 1168 1/32 印张 5.125 字数 129 千字

2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月第 1 次印刷

印数 1—1 000 册

ISBN 7-81076-602-3

S·399 定价: 18.00 元

前 言

目前,我国已全面启动了天然林保护工程,木材产量大幅度调减,木材供求矛盾更为突出。另外,遗传结构在赋予木材众多优点的同时也不可避免地带给木材固有的缺陷。木质复合材料通过利用木材与其他材料的复合效果,一方面尽量保持着木材的特性,另一方面又进一步改善木材的应用性能,以提高木材的利用率,扩大木材的使用范围,延长木材的使用寿命,来满足社会生产和人类生活的需要。因此,有专家预测,木质复合材料将是21世纪人类普遍关注、不断创新和发展的主题之一。近年来,我国在木质复合材料方面的研究和生产取得重大进展。为了能正确地使用这些木质复合材料,必须确切地掌握其物理力学性能。如果我们采用传统的破损检测方法,虽然测得的结果准确,但是经过破损检测后的试件通常已不再具有实用价值,造成极大的浪费;另外,这种检测方法耗时较长,条件苛刻,不适合于生产线上的连续快速检测。无损检测技术是一门新兴的综合性技术,属交叉学科,它不仅涉及传统的经典力学,复合材料力学,还与现代计算机技术以及FFT(快速傅立叶变换)分析技术的发展密切相关。无损检测的最大优点是不会破坏材料的原有特性,而且能在短时间内获得结果,以便使工作人员进行材质判断,有利于生产的连续性和生产效率的提高。通过对木质复合材料无损检测技术的研究,并进一步将其应用于实际,可以节约原材料,保证产品安全可靠。无损检测是实现质量控制,提高劳动生产率,向全自动化方向发展的重要手段。

本书以木材—塑料复合材(WP)、木材—纤维板复合材

(WF)、木材—金属复合材(WM)、木塑复合层压板(WPPW)、单板贴面刨花板复合材(VOP)、单板贴面中密度纤维板复合材(VOM)等木质复合材料为研究对象,论述了它们的动态特性和无损检测方法,构建了这些木质复合材料力学性能的预测模型,为木质复合材料力学性能的优化设计及其合理利用提供了科学依据。

书中研究成果是作者在导师顾继友教授、王逢瑚教授悉心指导下完成的。导师对本书的出版给予了极大的支持和帮助,在此表示由衷的谢意!在研究过程中,得到日本岛根大学中尾哲也教授、日本中国木材株式会社董玉库博士、东北林业大学刘一星教授的帮助以及国家留学基金委、中国政府派遣研究员项目以及东北林业大学科研基金的资助,谨此一并表示衷心的感谢!

由于水平所限,书中疏漏与不当之处,恳请读者批评指正。

著 者

2004年5月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 无损检测的主要方法及基本原理	(1)
1.1.1 缺陷的无损检测	(1)
1.1.2 物理力学性能的无损检测	(3)
1.2 木质复合材料概述	(5)
1.2.1 复合材料的定义及分类	(5)
1.2.2 复合材料的特点	(6)
1.2.3 木质复合材料的含义	(7)
1.2.4 木质复合材料的发展前景	(7)
1.3 木质材料的动态特性与无损检测概述	(8)
1.4 木质材料动态特性与无损检测研究的进展 与展望	(9)
1.4.1 国外研究进展	(9)
1.4.2 国内研究进展	(16)
1.4.3 研究展望	(17)
2 理论	(19)
2.1 振动理论	(19)
2.1.1 纵波传播理论	(21)
2.1.2 纵向共振理论	(22)
2.1.3 弯曲振动理论	(23)
2.1.4 表面波传播理论	(25)
2.2 复合材料的细观力学理论	(26)

3	木—塑、木—纤、木—金复合材料的动态特性与无损检测	(29)
3.1	绪言	(29)
3.2	试验材料与方法	(30)
3.2.1	试验材料	(30)
3.2.2	试验方法	(32)
3.3	结果与讨论	(34)
3.3.1	传声速度	(34)
3.3.2	动态弹性模量	(42)
3.3.3	动态剪切模量	(51)
3.4	小结	(59)
4	木塑复合层压板的动态特性与无损检测	(63)
4.1	绪言	(63)
4.2	试验材料与方法	(64)
4.2.1	试验材料	(64)
4.2.2	试验方法	(64)
4.3	结果与讨论	(67)
4.3.1	传声速度	(67)
4.3.2	动态弹性模量	(69)
4.3.3	动态剪切模量	(71)
4.3.4	剪应力分布系数	(73)
4.4	小结	(75)
5	单板贴面人造板复合材的动态特性与无损检测	(76)
5.1	绪言	(76)
5.2	试验材料与方法	(77)
5.2.1	试验材料	(77)
5.2.2	试验方法	(78)
5.3	结果与讨论	(78)

5.4 小结	(88)
6 动态与静态弹性模量及静曲强度之间的关系	(90)
6.1 绪言	(90)
6.2 试验材料与方法	(90)
6.2.1 试验材料	(90)
6.2.2 试验方法	(91)
6.3 结果与讨论	(91)
6.3.1 试件尺寸、测试方法对动态弹性模量检测值的影响	(93)
6.3.2 加载速度、跨距对静态检测值的影响	(95)
6.3.3 动、静态弹性模量之间的相关性分析	(99)
6.3.4 动态弹性模量与静曲强度的相关性分析	(101)
6.4 小结	(103)
7 各种动态检测结果之间的关系	(105)
7.1 绪言	(105)
7.2 试验材料与方法	(105)
7.2.1 试验材料	(105)
7.2.2 试验方法	(107)
7.3 结果与讨论	(107)
7.3.1 利用弯曲振动试验检测动态弹性模量	(107)
7.3.2 利用纵向共振试验检测动态弹性模量	(107)
7.3.3 利用纵波传播试验检测动态弹性模量	(110)
7.3.4 弯曲振动弹性模量与纵向共振弹性模量的关系	(110)
7.3.5 弯曲振动弹性模量与纵波传播弹性模量的关系	(116)
7.3.6 面外弯曲振动与面内弯曲振动弹性模量的关系	(124)

7.3.7	利用表面波传播法和弯曲振动法测定动态剪切模量	(128)
7.3.8	动态剪切模量与长厚比的关系	(131)
7.3.9	动态剪切模量与宽厚比的关系	(132)
7.3.10	面内剪切模量与面外剪切模量的关系	(133)
7.4	小结	(135)
8	结论	(137)
	参考文献	(141)

1 绪 论

1.1 无损检测的主要方法及基本原理

无损检测是一门以不破坏被检测对象的性质和使用效果为前提,对材料进行有效的检验和测试,借以评价材料的完整性(缺陷分析)或其他(物理力学)特性的综合性应用科学技术。

1.1.1 缺陷的无损检测

木质材料的缺陷主要包括天然缺陷(如斜纹理、木节、弯曲等)、干燥缺陷(如开裂、翘曲、皱缩等)、机械加工缺陷(如起毛、起皱、钝棱等)、生物危害缺陷(如变色、腐朽、虫害)等。上述缺陷不同程度地使木材材质受到影响,降低甚至完全失去其使用价值。为了节约木材资源,提高木材的利用率,几十年来人们一直在致力于研究迅速而准确地探测木材缺陷的方法。

对材料缺陷的检测与评价,是无损检测的重要内容,在无损检测的发展历史中,缺陷检测的历史最长,并逐渐得以发展。木质材料缺陷的无损检测也是如此。在初期,缺陷无损检测的方法主要有超声波检测、射线法检测、光学法检测、电学法检测等。自 20 世纪 80 年代以来,随着近代物理学、近代仪器分析技术以及木材科学技术的发展,一些过去仅用于材料化学结构分析或仅用于高级材料检测的近代仪器设备也开始被应用于木质材料缺陷的无损检测方面。下面就简要介绍一下其中的几种。

(1) 核磁共振法:核磁共振光谱(NMR)是类似于红外或紫

外光谱的另一种形式的吸收光谱。核磁共振光谱技术在分析材料的结构,尤其是在分析高聚物的结构方面取得了引人注目的进步。近年来,核磁共振成像技术又为人们研究物质材料的内部结构提供了新的有价值的方法。采用核磁共振成像技术来观察木材构造,可以清晰地显现木材的生长轮,边、心材和早、晚材特征。

研究证实,木材中的水分能充分地使质子核磁信号显像。由于不同结构之间其含水率有差异或干燥前后有明显的差异,因此导致核磁共振的性质不同。依据这一原理,可以利用核磁共振图像为人们提供有益的情报。利用这项技术不仅能观察到诸如生长轮等宏观结构特征,而且能探查到节疤、腐朽、孔洞等隐蔽在木材内部的一些缺陷。根据在腐朽或结疤等区域中质子的自旋—晶格弛豫时间的变化也为人们提供了分析内部结构的有价值的资料。

(2) 声发射法:所谓声发射是指材料受外力或内力作用产生变形或断裂,以弹性波形式释放出应变能的现象。各种材料声发射的频率范围很宽,从次声频、声频到超声频。由于声发射信号的强度很弱,人耳不能直接听到,需要借助灵敏的电子仪器才能检测出来。用仪器检测、分析声发射信号和利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射技术。近年来,声学检测方法有很大的发展,在无损检测技术中占有重要的地位,声发射检测是声学无损检测中的重要方法。

自 20 世纪 80 年代以来,国外已有许多关于声发射的研究论文发表,我国在此方面的研究也开始起步。这方面的研究主要是为了根据声发射来预报木材变形、开裂,改变干燥条件,从而达到在最优状态下自动控制木材干燥的目的。其次就是利用声发射技术无损检测木材的力学性质以及木材的缺陷。其基本原理和方法为:在外力作用下使木材发生变形,从而发出微小声波(声发

射 AE) 信号, 将此信号经传感器拾取, 经前置放大、鉴频放大后送至记录仪, 把每秒 (或 10 s) 间的声发射发生数和声发射累计发生数自动记录下来, 根据上述检测结果与木材力学性质和缺陷的关系, 推测木材的破坏程度以及缺陷对强度的影响程度。

(3) 红外光谱法: 红外光是波长为 $0.78 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$ 的电磁波。红外光谱学是研究红外光与物质分子间相互作用的学科, 因此可以从中获得许多物质微观世界的信息。在工程技术中, 它为探索材料的内部结构, 了解结构与性能的关系, 材料的改性和设计提供了科学依据, 是目前应用最广泛的光谱分析方法之一。

木材腐朽常常伴随着木材化学组分的生物降解, 木腐菌对木材组分的生物降解作用使化学结构发生变化, 而红外光谱是用来判定有机物、高聚物以及具有复杂结构的天然或人工合成产物分子结构发生变化的有效工具。研究证明, 用红外光谱结合核磁共振法可以分析和诊断木材的早期腐朽, 这是近年来产生的一种新型的无损检测木材缺陷的方法。

1.1.2 物理力学性能的无损检测

木质材料物理力学性能无损检测技术是建立在多学科的高级技术基础上的, 是无损检测技术的巨大发展, 标志着无损检测技术已由定性检测缺陷进入定量检测物理力学性能的新阶段。它将促进木质材料的传统测试方法发生根本的变革, 使木质材料的质量控制和管理达到一个新的水平, 为木质材料生产过程的工艺控制和自动化准备了必不可少的条件。检测木质材料的物理力学性能主要包括弹性模量、静曲强度、内结合强度、密度, 以及含水率等。目前, 对木质材料的物理力学性能进行无损检测的方法主要有以下几种。

(1) 超声波检测: 超声波是指频率高于 20 kHz, 人耳所不能听闻的机械波。超声波检测的基本原理是在被测固体材料 (如木

材、人造板等)的厚度与波长相比可以忽略的情况下,沿被测材料的长度方向传播的纵波的波速 c 与材料的密度 ρ 及弹性模量 E 的关系为: $E = \rho c^2$ 。因此,通过测定超声波经过预定距离的传播时间计算平均波速,然后可利用波速和密度计算材料的弹性模量。由于木材及人造板的力学破坏强度与弹性模量之间具有密切的正相关性,所以超声波检测不但能测量木材及人造板的声速和弹性模量,还可以对木材及人造板的强度进行有效的预测,从而改变了以往要测量木材及人造板力学强度必须破坏试件的传统测试方式,而且弹性模量的获得也比传统方法来得简捷、迅速。

(2) 微波检测:是指频率为 300 MHz ~ 300 GHz 的电磁波,其相应的波长范围为 1 m ~ 1 mm。微波检测在木材性质方面的应用主要是含水率检测,有时也用于密度检测。微波检测木材含水率的基本原理是:介质对微波的吸收与介质的介电常数成比例,水对微波的吸收最大,含水率的变化对木材介电常数影响也最大。因此,当发射天线发射的微波遇到被测木材基体并透射时,将由于水分子的强烈吸收作用而使透射功率发生变化,根据接收天线接收到的微波的功率变化与含水率之间的关系,即可测定出木材的含水率。

(3) 射线检测:用射线对木材及人造板的密度进行无损检测已在生产线上得到了广泛的应用,是比较成熟的技术。其基本原理是:以射线透射木材及人造板,用射线接收传感器直接测量窄小范围内透过试样前后射线强度的变化,根据射线衰减率以及试样的平均吸收系数推算出木材及人造板的密度。

(4) 机械应力检测:采用机械方法施加恒定变形于被测试样上,测得相应的载荷,由计算机系统算出试样的弹性模量和静曲强度,并能直接对被测试样做出应力分级。

(5) 振动法检测:在测试开始时,由计算机键盘输入被测试样的断面尺寸和测试支点间的距离。当施加外力使试样产生横向

振动之后, 计算机通过传感器测取被测试样的自由振动频率和自由振动的减幅率、被测材料的质量。计算机进行数据处理, 用数字显示被测试样的弹性模量。

(6) 冲击应力波检测: 应力波是指物质受撞击之后, 因内应力作用而产生的可在物质内传播的机械波。应力波测试技术是基于纵向应力波通过被测材料的速度与被测材料密度、弹性模量的物理关系而建立起来的。对于固体材料, 其弹性模量 E 与应力波速度 v 和材料密度 ρ 之间存在着下列关系: $E = \rho v^2$ 通过检测应力波传播速度就可确定弹性模量, 也可对静曲强度及内结合强度等进行有效的预测。

(7) FFT 分析检测法: FFT 是快速傅立叶变换 (Fast Fourier Transform) 的缩写。FFT 分析是一种利用电子计算机技术对信号频谱进行快速分析的方法, 其测试的基本原理是: 通过敲击试样使其产生挠曲振动, 并瞬间拾取音响来检测振动, 利用 FFT 进行瞬间频谱分析, 求出各次共振频率, 应用 Timoshenko 理论根据测得的共振频率以及试样的密度及外形尺寸, 由电子计算机计算得出被测试样的弹性模量 E 和剪切模量 G 。

1.2 木质复合材料概述

1.2.1 复合材料的定义及分类

复合材料 (Composite Materials) 一词大约出现在 20 世纪 50 年代, 随后, 多位学者对其含义进行了定义。目前一般认为复合材料是指由两种或多种不同材料以各种形式结合所形成的一种多相固体材料。复合材料既保持了原组成材料的一些性能, 同时通过材料设计, 又可使各组分的性能互相补充, 彼此关联, 产生复合效应, 从而获得新的优越性能。复合材料按使用性能可分为结

构复合材料和功能复合材料；按复合方式分为纤维复合材料、粒子复合材料、聚合物复合材料、夹层复合材料和骨架复合材料；按基体材料可分为金属基复合材料、陶瓷基复合材料、树脂基复合材料、碳基复合材料、水泥混凝土基复合材料、木材基复合材料等（沃丁柱，2000；郑昌琼，2002）。

1.2.2 复合材料的特点

与传统材料相比，复合材料有以下特点：

(1) 可设计性：复合材料与传统材料相比的显著特点是它具有可设计性。通过组分材料的选择和匹配以及界面控制等材料设计手段，可最大限度地达到预期目的，以满足工程设计的使用性能。

(2) 材料与结构的同一性：复合材料尤其是纤维增强复合材料，与其说是材料倒不如说是结构更为恰当。传统材料的构件成型是经过对材料再加工，在加工过程中材料不发生组分和化学的变化，而复合材料构件与材料是同时形成的，它由组成复合材料的组分材料在复合成复合材料的同时也就形成了构件，一般不再由“复合材料”加工成复合材料构件。由于复合材料这一特点，使之结构的完整性好，可大幅度地减少零部件和连接件数量，从而缩短加工周期，降低成本，提高构件的可靠性。

(3) 发挥复合效应的优越性：复合材料是由各组分材料经过复合工艺形成的，但它并不是几种材料简单的混合，而是按复合效应形成新的性能，这种复合效应是复合材料仅有的。复合后的材料特性优于组成该复合材料的各单一材料之特性。

(4) 材料性能对复合工艺的依赖性：复合材料结构在形成的过程中有组分材料的物理和化学变化，过程非常复杂，因此构件的性能对工艺方法、工艺参数、工艺过程等依赖较大，同时也由于在成型过程中很难准确地控制工艺参数，所以一般来说复合材

料构件的性能分散性也是比较大的（沃丁柱，2000）。

1.2.3 木质复合材料的含义

从广义上讲，在木材工业中，那些采用传统胶合工艺制成的木制产品如中密度纤维板、刨花板、胶合板等都可看做是复合材料，当然也可称为木质复合材料，甚至可以说木材就是一种完美的复合材料。但是，为了与上述有所区别，目前学术界一般认为木质复合材料是指由木质材料与其他一种或多种非木质材料复合而成的多相固体材料（王正，1994；张双保、杨小军，2001）。

1.2.4 木质复合材料的发展前景

木材是人类历史上应用最早的材料之一，在人类的发展过程中发挥了重要作用。由于木材具有质轻而强重比大、可生物降解、舒适的视觉和触觉效果、隔音、隔热等优点，在现代社会中，它仍然是材料世界中的主要成员。在钢材、木材、塑料、水泥这四大工程材料中，木材是惟一的可再生材料。只要实现了森林资源的可持续发展，木材资源就会取之不尽，用之不竭。然而，遗传结构在赋予木材众多优点的同时也不可避免地带给木材固有的缺陷。木质复合材料正是通过利用木材与其他材料的复合效果，一方面尽量保持着木材的特性，另一方面又进一步改善木材的应用性能，以提高木材的利用率，扩大木材的使用范围，延长木材的使用寿命，来满足社会生产和人类生活的需要。

从过去的经验来看，木质复合材料不是盲目、孤立发展的，而是与其他材料协调发展的，是整个材料科学发展的结果。材料科学的发展促进了木质材料科学的发展，现代复合材料科学的进步推动了木质复合材料科学的进步。复合材料是材料科学的发展方向，同样，木质复合材料也将是木质材料的发展方向。有专家预测，木质复合材料将是 21 世纪人类普遍关注、不断创新和发

展的主题之一（张双保、杨小军，2001；李坚，1995）。

1.3 木质材料的动态特性与无损检测概述

木质材料是生物材料中的一种，拥有许多独特的性能，广泛应用于建筑、家具、乐器、车辆、船舶、医疗器械等各个行业。关于木质材料的动态特性，主要可分为以下两个研究领域：一是住宅的隔音性及乐器的音响特性；二是利用动态特性来预测木质材料物理力学性能的无损检测。

由于木质材料用途非常广泛，为了正确地使用它，需要了解它的内部材质情况。传统的做法是将木质材料破坏再检测，这种以破坏材料方式来获取材质指标的做法，称为破坏性检测，虽然这种方式测得的结果准确，但经过破坏测试后的试件通常已不再具有实用价值，造成很大浪费，并且由于无法对所有产品进行百分之百的检测，因此也无法保证木质材料的材质万无一失。另外，这种检测方法耗时较长，条件苛刻，不适于生产线上的连续快速检测。在这种情况下，在借鉴其他材料科学领域研究成果的基础上，开始应用一门新兴的综合性科学技术——无损检测。所谓无损检测（又称非破坏检测），是在不破坏物质原有材质和形状情况下，对材料的一些特性进行检测。这种无损检测最大的优点是不会破坏材料的原有特性，而且能在短时间内获得结果，以便使工作人员进行材质判断，有利于生产的连续性和生产效率的提高。有时可能会在不严重影响制品主要功能的前提下，需要稍微破坏制品原有材质或形状来进行材质判定的工作，这种需要部分破坏的做法，称为部分破坏检测，但是为了有利于分辨，通常将这种部分破坏检测也广义称之为非破坏检测（日本非破坏检查协会，1957）。通过对木质材料无损检测的研究，并进一步将其应用于实际中，可以节约原材料，保证产品安全可靠。无损检测