

用应力波非破损检测技术 检测中密度纤维板弹性模量的研究

王志同 曹志强 袁卫国

(中国林科院木材工业研究所 北京 100091)

摘要 本研究探讨了采用现代电子技术精确测定波速的方法;研究被测物的弹性模量与其密度和应力波波速之间的关系;研究应力波非破损测定中密度纤维板的弹性模量与国家现行标准规定的破损法测定的弹性模量之间的相关性。研究表明:应力波非破损测试法测定的中密度纤维板弯曲弹性模量具有足够精确的保证,从而为实现中密度纤维板生产线产品质量以力学性能为标准在线检测系统的正常运行和生产线的自动控制成为可能。

关键词 弹性模量;非破损检测;破损性检测;应力波;相关性

中密度纤维板是美国在 60 年代初期发明的板种。1966 年美国建成世界上第一个中密度纤维板厂,1993 年初,全世界中密度纤维板的生产能力已达到 903 万 m^3 ^[1]。亚洲是中密度纤维板发展最快的地区,而中国中密度纤维板的生产位居亚洲之首。中国中密度纤维板的年产量在 1988 年为 26.5 万 m^3 ;1994 年底已投产的 MDF 厂有 23 家,生产能力为 54.5 万 m^3 ,在建的或正在筹建的生产线数量更多,其中有好几条是年产 10 万 m^3 的大型生产线,大大超过了原规划在 2000 年为 50 万 m^3 ,占人造板年产量十分之一^[2,3]的指标要求。

中密度纤维板是一种重新组合,组织均匀、密度适中的纤维板材,具有良好的物理力学性能、音响性能、机械加工性能、装饰性能和尺寸稳定性能。在生产过程中易加入各种添加剂而制成适合于各种用途的板材。因此,在家具、建筑、家用电器、乐器及交通运输等行业中得到广泛的应用。1988 年 8 月它作为火车车厢内的结构材料与装饰材料的试验通过了部级鉴定^[4],1991 年 10 月上海已开始为民用建筑领域应用中密度纤维板。

中密度纤维板的弹性模量是其重要的力学性能之一,与静曲强度、平面抗拉强度等力学性能均相关^[5]。依据相关性可以由弹性模量预报静曲强度等性能,这是利用应力波非破损性检测技术的基本点。

本研究探讨了采用现代电子技术精确测定波速的方法;研究被测物弹性模量与密度及应力波在被测物内波速之间的关系;研究应力波非破损测定的中密度纤维板弹性模量与国家现行标准规定的破损法(以下简称破损法)测定的弹性模量之间的相关性。应力波非破损检测技术将使中密度纤维板以力学性能为标准实现在线逐件检测产品质量监督和质量保证系统的运行和生产线的自动控制成为可能。非破损检验法取代了传统的抽样检验法,检验工作得到简化,避免了产品的抽样损失。非破损在线检测可以较大程度地减少现行常规抽样检验法导致的误判、迟判所造成的大量废品,保证了产品的质量,降低了废品率,提高了生产效益。非破损在线逐件定量检验为每张中密度纤维板提供了作为结构材料应用时所必需的力学性能数据,为板材的合理可靠应用准备了条件。

1 试验方案的确定

• 17 •

收稿日期 1995-03-25

为了研究应力波非破损法测定中密度纤维板的弹性模量与国家现行标准的破损法测定的弹性模量之间的相关性,本研究所用的试件均按 GB 11718.3—89 标准规定的长度为板材厚度的 15 倍再加 50mm,但不小于 200mm,宽度为 50mm。试件按 GB 11718.8—89 进行破坏性试验,即试验机压头与试件长度中心线重合,测试时加荷均匀,加荷速度为 $0.125 \pm 0.063 \text{ mm/s}$,试件支座跨距为板材厚度的 15 倍,不小于 150mm。

当前较为广泛应用的应力波非破损测试方法有:超声波波速及波形测试法、脉冲反射波波速测试法、应力波传播时间测试法等,其结构简图如图 1 所示。超声波波速及波形测试法因为测试结果受到试件与超声波发射器及接收器的耦合程度的影响较大。除了用油性耦合剂外,亦有用水溶性耦合剂进行了各种试验。耦合剂对试件的渗透很快,而耦合剂渗透造成的污染无法避免与消除。从查阅到的有关资料,尚无介绍对木材及木质制品不渗透的耦合剂,这就使超声波波速及波形测试

法难于在工业生产实际中应用。脉冲反射波波速测定法是在试件上用双面胶纸将压电膜加速度计(Kynar Piezo Film)固定在试件表面,其输出端接至数字示波器的输入端。当冲击锤撞击试件的一端时,在试件内产生一个沿试件长度轴线方向传播的纵向应力波,其相应的波形显示于示波器的屏幕上。测定两个相邻的波形的间隔时间(t)、试件长度及压电膜加速度计在试件上的位置就可以计算出波速。压电膜加速度计的轴向长度为 40mm,不适用于厚度较薄的板材的试件,因为试件太短。

应力波传播时间测试法是在试件需要测定的部位的两端分别设置一个 3021 型高灵敏度加速度传感器,以检测传经该处的波。传感器的输出分别作为计时器的启动与关闭信号,计时器所显示的时间就是波传经两个传感器之间的距离所需的时间,这样就能计算出波的传播速度。安装在框形构架上的—端装有直径为 22.22mm、经过硬化处理的钢球冲击摆,在试件中激发出应力波。本研究选用

239A 型应力波计时器,其分辨能力为 $1\mu\text{s}(10^{-6}\text{s})$ 。当试件端面受到冲击锤撞击时,一开始只有那些受到外力作用的端面部分的介质质点离开了初始平衡位置。这部分质点与相邻的介质质点之间发生了相对运动(变形),将受到相邻介质质点的反作用力。相邻介质质点也离开了初始平衡位置而运动。由于介质质点具有惯性,相邻介质质点的运动将滞后于表面介质质点的运动。以此类推,外载荷在表面上所引起的扰动就这样在介质中逐渐由近及远传播出去而形成应力波。扰动区域与未扰动区域的界面称为波阵面,其传播速度称为波速。介质质点本身的运动速度方向和波速的方向一致的波称纵波,本研究的方法即为纵向应力波非破

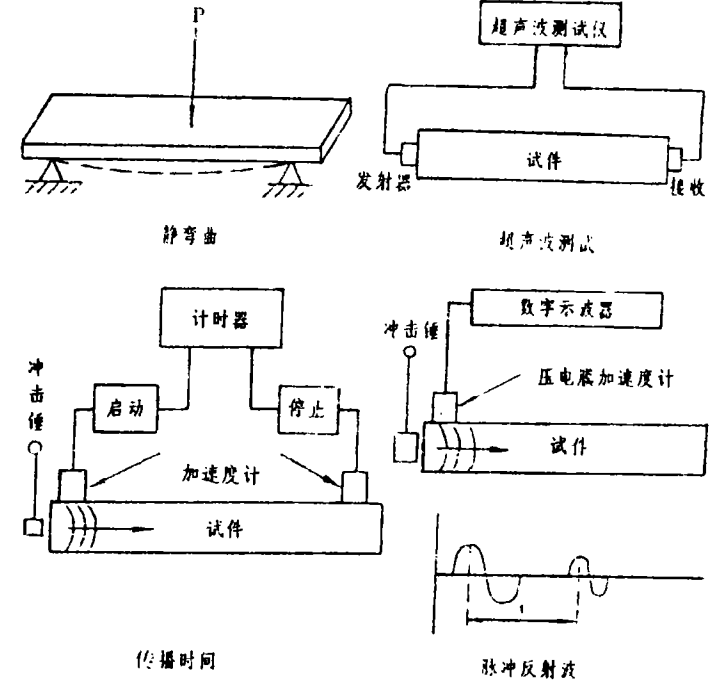


图 1 几种非破损测试方法

损测试法。传感器与试件之间不需要任何耦合剂,因而不存在污染试件的现象,测试的结果亦不受耦合剂耦合程度的影响。这是它与超声波测试法不同之处,亦是它能得到广泛应用的原因之一。现代电子技术的发展,使得精密的瞬间测量成为可能,用应力波测试法作为确定材料动态力学性能的方法是无损、可靠、快速和简捷的方法,对被测试件无污染、受外界的影响与干扰小,装置简单造价低,易于掌握与推广。因此选定应力波传播时间测定法作为本研究的测试方法。

在应力波非破损测试原理的研究方面,多年来各国学者均致力于物质的弹性模量(E)与在其中传播的应力波波速(C)间相互关系的研究。纵向应力波非破损测试技术是运用低应力分子振动时测定物质能量的贮存与耗散特性。一种波在物质内传播的速度显示了低应力分子振动状态的能量贮存特性。能量耗散特性的外部表现形式是低应力分子振动的衰减率。Jayne^[6]假设并证明了能量的贮存与耗散特性是与确定物质静态力学性能的机理有关,能够用统计回归分析方法得到这些特性和物质的静态力学性质之间的有用的数学关系式。

一般的木材与木材制品具有弹性、塑性和蠕变等力学性质,因此可作为粘弹性固体材料进行研究^[7]。当一根均匀的、不受约束的粘弹性物质的棱柱形杆棒的一端,受到一个作用时间非常短、而且均匀分布的压力时,端部存在一个压缩区域,在这个压缩区域内,杆棒分子质点相对于端部运动,这个区域(或波)立即沿着杆棒开始运动。在这个波的上升前沿的质点被激活而在波的下降沿的质点趋向静止。波沿着杆棒以恒定速度移动。在杆棒的 x 位置上一段极微小长 dx 的杆棒上的轴向力如图2所示。

假设

(1)当波沿着杆棒传播时,杆棒的横断面均保持平面状态,在每一个断面上的质点仅在 x 方向运动。

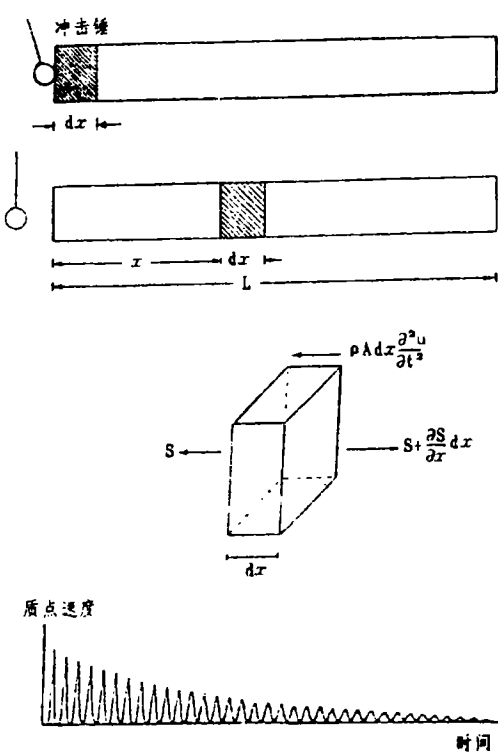


图2 棱柱形杆棒受力及运动分析

(2)垂直于应力波传播方向将伴随着这样一个振动过程中产生的纵向伸长与压缩而出现一些小的变形。

(3)纵向应力波的波长比垂直于波前进方向的杆棒尺寸大时,垂直于波的前进方向的位移对纵向运动的影响可以被忽略而不会有显著的误差。

这样, dx 上的轴向力可用下式表示:

$$S + \frac{\partial S}{\partial x} dx - S - \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

式中: $U(x,t)$ 为位于杆棒 x 处横截面上的质点的纵向位移;

S 为作用于杆棒 x 处横截面上的质点的内部轴向力;

ρ 为杆棒的质量密度;

A 为杆棒的横截面面积。

可运用有关应力-应变关系表达物质的粘弹性如下式:

$$\sigma_x = E \epsilon_x + \bar{C} \dot{\epsilon}_x \dots\dots\dots (2)$$

上式中的 σ_x 为轴向应力、 E 为弹性模量、 $\bar{C}$ 为固有衰减系数及 ϵ_x 为轴向应变。

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{而} \quad \dot{\epsilon} = \frac{\partial \epsilon_x}{\partial t}$$

如果用轴向应力表示轴向内力,则

$$S = \sigma_x \cdot A = (E\epsilon_x + \bar{C}\dot{\epsilon}_x)A \quad \dots\dots\dots (3)$$

由(1)、(2)、(3)式可得到运动的微分方程式为:

$$\frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\bar{C}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2 \partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

上式中 $\bar{C}$ 系数项描述内摩擦机理。由于内摩擦的作用,分子运动时的弹性能量以热的形式消耗了。内摩擦的作用并没有影响到波的传输速度,而只是使各个质点的运动衰减,最后导致全部质点最终趋向静止。

假设方程式(4)可以下列等式分解:

$$U_{(x,t)} = X_{(x)} T_{(t)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

将(5)式代入(4)式得:

$$\left(\frac{E}{\rho} + \frac{\bar{C}}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} \right) \ddot{X}_{(x)} T_{(t)} = X_{(x)} \ddot{T}_{(t)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

这里 $\ddot{X}_{(x)} = \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}$ 及 $\ddot{T} = \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}$

(6)式移项后可得:

$$\frac{\ddot{T}_{(t)}}{\left(\frac{E}{\rho} T_{(t)} + \frac{\bar{C}}{\rho} \dot{T}_{(t)} \right)} = \frac{\ddot{X}_{(x)}}{X_{(x)}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

方程(7)的左边都是时间(t)的函数,而其右边都是距离(x)的函数,如果上式成立,则两边必须等于一个常数,设这个常数为 $-\frac{P_i^2}{C^2}$,并令 $C^2 = \frac{E}{\rho}$,那么(7)式可以写为:

$$\frac{\ddot{T}_{(t)}}{\left(C^2 T_{(t)} + \bar{C} \dot{T}_{(t)} \right)} = \frac{\ddot{X}_{(x)}}{X_{(x)}} = -\frac{P_i^2}{C^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

方程(8)可以写成二个常系数微分方程:

$$\ddot{X}_i + \frac{P_i^2}{C^2} X_i = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\ddot{T}_i + \frac{\bar{C}}{\rho} \frac{P_i^2}{C^2} \dot{T}_i + P_i^2 T_i = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

方程(9)的解为:

$$X_i = C_i \cos(P_i X/C) + D_i \sin(P_i X/C) \quad \dots\dots\dots (11)$$

若令 $\alpha_i = \frac{\bar{C} P_i^2}{2E}$,则方程(10)可以写成:

$$\ddot{T}_i + 2\alpha_i \dot{T}_i + P_i^2 T_i = 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

方程(12)的解为:

$$T_i = e^{-\alpha_i t} (A_i \cos \beta_i t + B_i \sin \beta_i t) \quad \dots\dots\dots (13)$$

由方程(12)的特微方程可得:

$$\beta_i = \sqrt{P_i^2 - \alpha_i^2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

将方程(11)和(13)代入(5)可得到一根均匀的粘弹性杆的纵向自由振动的通解为:

$$U_{(x,t)} = \sum_{i=0}^{\infty} e^{-\alpha_i t} (A_i \cos \beta_i t + B_i \sin \beta_i t) \cdot [C_i \cos(P_i X/C) + D_i \sin(P_i X/C)] \quad \dots\dots\dots (15)$$

(15)式中的 A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i 可以由边界条件求解。如果杆棒两端为自由端,在杆棒两端的力为零,则边界条件为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0,L} = 0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

则 $D_i = 0$, $P_i = i\pi C/L$

则(15)式可得到如下的解:

$$U_{(x,t)} = \sum_{i=0}^{\infty} e^{-\alpha_i t} (A_i \cos \beta_i t + B_i \sin \beta_i t) \cdot \cos\left(\frac{i\pi x}{L}\right) \quad \dots\dots\dots (17)$$

(17)式显示沿着杆棒的每一个横截面以一个周期性方式在运动;质点的运动随时间按指数规律衰减,它的衰减率是杆棒的固有衰减性质的函数;沿着杆棒传播的波速是不变的,它是由传播波的物质的性质决定的。

1965年 Bertholf L. D.^[8] 推导了二个有关质点运动速度与波速有关的独立公式。其一是借助于分析在杆棒内由一个已知给定的应力所导致的变形。公式写成如下形式:

$$V = \frac{\sigma \cdot C}{E} \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中: V 是质点运动的速度; σ 是应力; E 是弹性模量; C 是波速。

其二是借助于传播波的动量变化等于触发力的冲量,即:

$$V = \frac{\sigma}{\rho \cdot C} \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中: ρ 是传播波的介质的质量密度。

由(18)与(19)式可得

$$C^2 = \frac{E}{\rho} \dots\dots\dots (20)$$

在无限大的均匀固体介质中,传播的纵波波速(C)与介质的弹性模量(E),介质的泊松比(μ)和介质的密度(ρ)之间存在着下列关系^[9]:

$$C = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \dots\dots\dots (21)$$

(20)式是在介质中传播的纵波,其波长比垂直于波传播方向的介质尺寸大时的(21)式的特解。

因此,应力波非破损测试方法可以在测定应力波波速与介质的密度后计算出介质的弹性模量。

(未完待续)

欢迎订阅 1996 年

《木材加工机械》杂志

《木材加工机械》杂志是由林业部北京林业机械研究所主办,国内外公开发行的全国木材加工机械技术指导性刊物。主要报导:国内外木材加工机械行业的最新研究成果及发展趋势,木材加工机械的设计制造、技术革新和使用维修经验,标准及检测技术,人造板生产工艺等等。其内容包括,人造板机械、制材机械、木材干燥设备、家具设备、地板块机械、竹木制品机械及林产化工设备等。本刊热忱欢迎广大企业在本刊发布产品广告,并竭诚为企业进行优质、高效的服务。

本刊为季刊,每季中月出版,16 开 40 页。每期定价 2.00 元,全年 8.00 元。刊号 ISSN1001-036X/CN11-2680/S。自办发行,全年均可订阅,订读者可通过邮局或银行汇款至:

北京市和平里七区 25 楼《木材加工机械》编辑部 邮编:100013

开户行:工商银行北京和平里分理处 帐号:891116-17 户名:林业部北京林业机械研究所(请注明“杂志订阅费”)

欢迎订阅

《林业机械》杂志

《林业机械》主要报道国内外林业机械、木工机械、人造板设备及园艺工具等的研究、设计、制造、试验、使用维修和管理等方面的最新成果及先进经验,介绍林业机械的发展动向,提供有关信息。设有综述、试验研究、设计计算、企业管理、林机论坛、企业之家、设备改造、推广应用、使用维修、咨询服务、产品推荐、国外林机、林机信息等栏目,是林机及相关行业中从事科研、技术、生产管理、开发及供销工作人员的必备参考资料。

《林业机械》为双月刊,16 开、彩色封皮、插页,国内外公开发行,定价 3.00 元,全年定价 18.00 元。国内统一刊号:CN 23-1242/S,发行代号:14-74。

全国各地邮局均可订阅,汇款请寄哈尔滨市学府路 374 号《林业机械》编辑部收,邮编:150086;

银行汇款清汇:林业部哈尔滨林机所;

开户银行:工商银行哈尔滨市和兴支行,

帐号:421144903-86。

一九九六《木材工业》广告征集启事

为迎接 1996 年国内木材加工行业规模最大的“第六届国际木工及家具机械展览”,充分利用这一与国内外同行们进行技术、信息交流的好机会,我刊拟安排《木材工业》杂志 1996 年第一期参加此次展览。现开始征集、预定 1996 年杂志广告(连载可优惠),欢迎国内外的企、事业单位宣传、介绍您的新产品、新设备和新技术,用我版面,扬您美名!版面位置有:封底、封 2、封 3 及插页 1~8,按来稿先后顺序排定。有关刊登广告细则见本期杂志第 27 页,广告价目表及合同可通过电话或信函向《木材工业》编辑部索取。

地址:北京市颐和园后中国林科院 29 信箱

邮编:100091

电话:(010)2582211-416

传真:(010)2581937