

# 声频法测定材料弹性模量的研究<sup>\*</sup>

吕红明<sup>1,2</sup> 余卓平<sup>1</sup> 李鹏飞<sup>2</sup> 张英<sup>2</sup>

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 盐城工学院车辆工程系, 盐城 224051)

**摘要** 针对悬臂梁结构, 采用麦克风、声卡、计算机及 Adobe Audition 3.0 软件构成的非接触式声学测试分析系统, 通过瞬态冲击使试件产生振动, 经计算机声卡和信号处理软件测试声压信号, 然后根据悬臂梁固有频率理论公式, 计算得到尼龙棒的弹性模量, 并进行了有限元逆分析验证。该系统具有结构简单、操作方便、价格低廉、测试精度高等优点。

**关键词** 弹性模量 声频法 悬臂梁 测试

弹性模量是工程材料的一个重要物理参数, 表示材料抵抗弹性形变的能力。测量材料弹性模量的方法主要有两类<sup>[1-2]</sup>: 一类是经典的静态测量法, 即从应力和应变曲线确定弹性模量, 该方法的测量精度低, 其载荷大小、加速度等都会影响测试结果, 由于受弛豫过程等的影响, 不能真实地反映材料内部结构的变化, 对脆性材料无法进行测量; 另一类是动态测量法, 它是在试件承受交变应力产生很小应变的条件下, 利用试样的固有频率与几何尺寸、密度、弹性模量之间的对应关系间接测量弹性模量。根据振动激励方式不同, 动态测量法又可分为共振法和振动法, 该方法测量速度快, 测量精度高。但是, 由于需要通过振动激励装置产生试件的振动, 再利用加速度传感器获得振动信号, 然后经过信号调理器、信号采集系统, 最终由计算机对信号进行分析处理, 从而获得试件的固有频率。因而专业测量系统往往存在装置复杂、价格昂贵、携带不便及调试维护困难等缺点, 难以在中、小型企业和对移动性较高的场合进行推广。

笔者根据物体的振动会引起空气振动而形成声波, 提出了一种材料弹性模量的声学测量方法, 将被测试件一端夹紧固定, 形成悬臂梁, 利用瞬态冲击使试件产生振动<sup>[3]</sup>, 然后通过计算机声卡和信号处理软件测试声压信号, 再根据悬臂梁固有频率理论公式, 计算试件的弹性模量。整个测试装置为非接触式测量, 具有结构简单、价格低廉、测试精度高等优点, 能够加快产品的开发。

## 1 测试原理

悬臂梁的振动属于连续弹性体的振动, 它具有无限多自由度及其相应的固有频率和主振型, 其振动可表示为无穷多个主振型的叠加。对于细长的梁体振动, 仅考虑弯曲引起的变形, 而不计剪切引起的

变形及其转动惯量的影响, 这种力学分析模型称为欧拉-伯努利梁, 其振动微分方程式<sup>[4]</sup>为:

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中:  $y$ ——梁轴线的横向位移;

$x$ ——梁轴线坐标。

$\alpha = \sqrt{EI/\rho A}$ , 其中  $E$  为梁的弹性模量,  $I$  为横截面惯性矩,  $\rho$  为梁的密度,  $A$  为梁的横截面积。

由分离变量法及悬臂梁的边界条件, 可得到悬臂梁的频率方程:

$$\cos \beta L \cdot \operatorname{ch} \beta L = -1 \quad (2)$$

式中:  $\beta^4 = \omega^2/a^2 = m\omega^2/EI$ 。

根据式(2), 悬臂梁的各阶固有频率  $f_{ni}$  为:

$$f_{ni} = \frac{(\beta_i L)^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

式中:  $\beta_1 L = 1.875$ ,  $\beta_2 L = 4.694$ ,  $\beta_3 L = 7.855$ ,  $\beta_4 L = 10.996$ ,  $\beta_5 L = (i - 0.5)\pi, \dots$

则圆形截面材料的弹性模量为:

$$E' = \frac{64L^4 \pi^2 \rho f_{ni}^2}{(\beta_i L)^4 d^2} \quad (4)$$

因此, 只要测出悬臂梁的直径  $d$ 、长度  $L$ 、密度  $\rho$  弯曲振动的固有频率  $f_n$ , 即可计算出弹性模量  $E'$ 。

## 2 测试方案

### 2.1 实验框图

特定材料、尺寸和形状的悬臂梁在受到脉冲激励后, 会产生振动并发出一定的声音, 反映了结构的固有动态特性。通过麦克风测量声压信号, 并经计算机声卡转换为电信号, 再经信号分析软件进行数据采集和频谱分析, 可以得到试件悬臂梁结构的固

<sup>\*</sup> 江苏省重点建设学科项目(XKY2009058)、江苏省大学生实践创新计划(20101035)

收稿日期: 2010-08-01

有频率,从而计算出材料的弹性模量。笔者提出的声频法测定材料弹性模量的实验框图如图 1 所示。

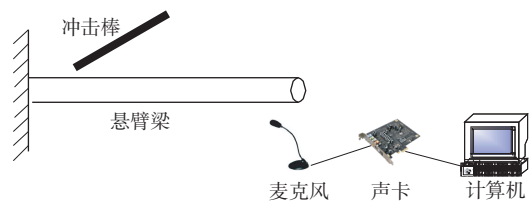


图 1 材料弹性模量声学测量实验框图

2.2 实验仪器

麦克风: Hyundai M600 型, 频率响应 15 ~ 15000 Hz, 灵敏度  $-58 \pm 3$  dB, 韩国现代公司;  
声卡: SoundMAX 型, A/D 转换精度 16 位, 信号测量范围 10 ~ 22000 Hz, 美国 ADI 公司;  
计算机: Dell Optiplex 760, 戴尔公司;  
信号采集与分析软件: Adobe Audition 3.0, 选用单声道、采样频率 44.1 kHz 进行声音录制, FFT 运算长度  $N = 65536$  进行信号分析。

2.3 测试方法

将一定长度的试件装夹固定,形成悬臂梁结构,用硬塑料制作的冲击棒在靠近悬臂梁固定端位置迅速敲击试件并脱离,形成瞬态冲击,可激起试件的横向振动。麦克风安放在试件自由端的下方 2 ~ 3 cm 处采集振动信号,应用 Adobe Audition 3.0 进行声音录制和分析。

3 测试结果与验证

尼龙(PA)6 具有韧性好、耐磨力强、耐油、抗震、拉伸和弯曲强度高,以及吸水性小、尺寸稳定性好等特点,常用于加工各种耐磨的高强度零件。但是由于生产工艺的不同,各企业甚至各批次产品的特性都会存在较大差异,而在工程手册<sup>[5]</sup>中往往给出材料特性的范围或均值,不利于工程应用。

本测试用的 PA6 棒实测直径  $d = 0.0304$  m, 密度  $\rho = 1040$  kg/m<sup>3</sup>。考虑到过长的悬臂会由于第一阶固有频率过低 ( $< 15$  Hz) 难以测量,且棒材自身弯曲变形也会显著影响计算结果;而悬臂过短会由于截面两侧的剪切作用和试件在振动过程中的回转作用而导致结果误差变大<sup>[6-7]</sup>,故选取悬臂长度  $L = 0.55$  m, 实验装置如图 2 所示。

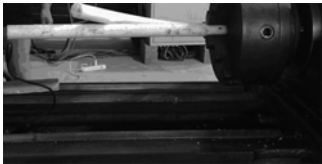


图 2 材料弹性模量测试装置

应用声频测量方法,并经信号采集及分析,得到时域响应和频域响应分析,如图 3 和 4 所示。

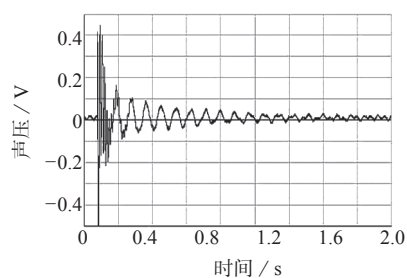


图 3 悬臂梁时域响应

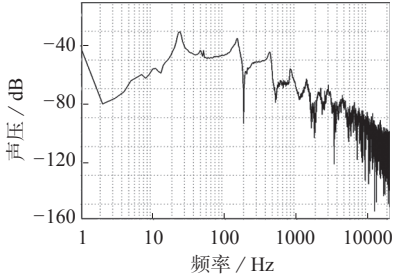


图 4 悬臂梁频域响应

根据公式(4),分别计算出前 4 阶固有频率对应的材料弹性模量,如表 1 所示。由表 1 可以看出,材料弹性模量的均值为 2.90 GPa,且误差均小于 2.5%。

表 1 材料固有频率及弹性模量

| 阶次 | 固有频率/Hz | 弹性模量/GPa | 相对误差/% |
|----|---------|----------|--------|
| 1  | 23.4    | 2.88     | -0.69  |
| 2  | 147.5   | 2.91     | 0.34   |
| 3  | 417.0   | 2.97     | 2.41   |
| 4  | 799.8   | 2.85     | -1.72  |

另外,本研究还根据弹性模量计算值,取泊松比  $\mu = 0.34$ ,应用有限元软件 Abaqus 6.8 进行了悬臂梁模态分析,分别得到前 4 阶固有频率,并与理论计算频率及实测固有频率进行对比,如表 2 所示,其中第一阶有限元计算值与实测值相对误差最大,但也仅为 3.4%,表明了两种计算结果的一致性。

表 2 悬臂梁固有频率对比

| 阶次 | 实测值/Hz | 理论值/Hz | 有限元值/Hz |
|----|--------|--------|---------|
| 1  | 23.4   | 23.5   | 24.3    |
| 2  | 147.5  | 147.1  | 150.2   |
| 3  | 417.0  | 412.0  | 413.7   |
| 4  | 799.8  | 807.2  | 792.2   |

为了验证利用悬臂梁结构测定材料弹性模量的正确性,笔者对长为 0.184 m 的同种 PA6 棒进行了自由模态试验,得到其一阶弯曲固有频率为 1268.9 Hz,经有限元逆分析,得到弹性模量为 2.91 GPa,与悬臂梁法测量结果一致,误差为 0.38%。

4 结论

根据实际测量的悬臂梁各阶固有频率进行理论计算和有限元逆分析,得到的材料弹性模量吻合度好,且与自由模态逆分析结果一致,表明基于悬臂梁的材料弹性模量声频测量方法的正确性与可靠性。该方法利用麦克风、声卡、计算机及 Adobe Audition 3.0 软件搭建的非接触式测试分析系统,无需加速度传感器、应变片及专业数据采集系统,具有结构简单、操作方便、分析快捷、价格低廉、测试精度高等优点。如与有限元计算相结合,还适用于不同形状零件的材料特性分析<sup>[8-9]</sup>,具有较好的工程应用前景。

参考文献

[1] 连法增. 材料物理性能[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2005.

[2] 刘吉森, 张进治. 杨氏模量的动态法测量研究[J]. 北京工业大学学报, 2006, 18(1): 49-52.

[3] 顾利忠, 苏菲, 赵颖, 等. 用瞬态激振法测量微机械材料的弹性模量[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(9): 126-128.

[4] 诸德超, 荆誉峰. 工程振动基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.

[5] 李春胜, 黄德彬. 机械工程材料手册(下册): 非金属材料[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.

[6] 张长会. 提高固有频率测量精度的声频法及其工程应用[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2005, 28(12): 1556-1560.

[7] 吕家才, 周春天, 刘明明, 等. 梁长对悬臂梁振动测定材料动弹性模量的影响[J]. 河海大学学报, 2006, 34(5): 561-563.

[8] 冯霞, 赵晓丹. 用有限元法测量农业机械工程材料的弹性模量[J]. 农机化研究, 2006(8): 156-159.

STUDY ON MEASUREMENT OF MATERIAL ELASTIC MODULE THROUGH ACOUSTIC-FRQUENCY METHOD

Lü Hongming<sup>1, 2</sup>, Yu Zhuoping<sup>1</sup>, Li Pengfei<sup>2</sup>, Zhang Yin<sup>2</sup>

(1. School of Automotive Engineering of Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Department of Vehicle Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

**ABSTRACT** A elastic module measurement system composed of microphone, sound card, computer and Adobe Audition 3.0 is proposed for the cantilever beam. The beam vibration characteristics caused by the instantaneous impact are tested and analyzed by the measurement system. Then the elastic module of PA6 is computed according to the cantilever natural frequency formulas. The result is verified by finite element inverse analysis. The measurement system has the advantages of simple structure, easy operation, low cost and high test precision.

**KEYWORDS** elastic module, acoustic-frequency method, cantilever beam, measurement

宜兴市东山新材料有限公司

碳化硅微粉

我公司生产的碳化硅微粉采用气流粉碎, 细度 < 2 μm, 具有纳米材料的性能, 而价格只有其 1%, 它具有分散性好, 和塑料相容性好, 耐酸、耐碱、耐磨, 强度达九级, 明显改善塑料的耐磨性、强度、耐候性、耐高温性。

硅微粉

本品是石英经 2800℃ 电熔气化冷却的硅微粉, 具有不饱和硅酮, 和塑料的亲性好, 性能好, 但价格便宜, 只有 3 元/公斤。

陶瓷釉粉

各种熔点、各种细度陶瓷釉粉, 由于力学性能好, 耐酸、耐碱, 可提高塑料的耐磨性及力学性能。

东山公司以自主创新为立厂之本, 具有超强的自主开发能力, 欢迎各界朋友合作, 共同开发新材料、新工艺取代进口, 欢迎您提出特种需求。公司可供无机材料 200 多种, 可供各种规格玻璃粉末。

厂址: 江苏省宜兴市大浦镇宜浦路工业园区 邮编: 214226

电话: 0510-87457988( 传真), 87457669, 13906152806 E-mail: web@188X.com

http://www.188X.com 开户: 工行东山办 账号: 1103028909000039117