

文章编号:1673-887X(2021)02-0031-04

音频法在钛铝粉末冶金材料弹性模量测量中的应用

孙 恰,冯 涛,王余华,王远涛,王 晶,王艺瀚
(北京工商大学 人工智能学院,北京 100048)

摘 要 通过敲击杆件产生的声信号频谱峰值频率,对应得到杆件固有频率,再由其固有频率和弹性模量关系式计算得到材料弹性模量。以低碳钢杆件为样件,通过实验得到杆件的敲击声信号,对声信号进行频谱分析得到杆件振动固有频率,计算出的杆件弹性模量与已有结果基本相符。对低碳钢杆件进行有限元模态分析,揭示了杆件自由弯曲振动的一阶固有频率与声信号频谱峰值的对应关系。将音频法应用于一种钛铝粉末冶金材料,测得其弹性模量为81GPa。

关键词 粉末冶金;弹性模量;音频法;固有频率;有限元分析

中图分类号 TF122

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1673-887X.2021.02.013

Application of Audio Frequency Method in Elastic Modulus Measurement of Titanium Aluminum Powder Metallurgy Materials

Sun Qia, Feng Tao, Wang Yuhua, Wang Yuantao, Wang Jing, Wang Yihan

(School of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: The natural frequency of the rod is obtained by the peak frequency of the spectrum of the acoustic signal generated by knocking the rod, and then the elastic modulus of the material is calculated by the relationship between the natural frequency and the elastic modulus. Taking the low carbon steel rod as the sample, the percussion signal of the rod is obtained through the experiment, and the natural frequency of the vibration of the rod is obtained through the spectrum analysis of the sound signal. The calculated elastic modulus of the rod is basically consistent with the existing results. The corresponding relationship between the first natural frequency of free bending vibration of low carbon steel rod and the peak frequency of acoustic signal spectrum is revealed by finite element modal analysis. Applying audio frequency method to a titanium-aluminum powder metallurgy material, the elastic modulus of the material was measured to be 81GPa.

Key words: powder metallurgy, elastic modulus, audio method, natural frequency, finite element analysis

农业机械化是实现农业现代化的关键^[1]。近年来,随着粉末冶金技术的迅猛发展,粉末冶金材料已被应用于农产品加工机械设备的齿轮、轴承等零配件中,在以摩擦方式进行食品加工的设备中应用广泛^[2];同时,粉末冶金良好的耐磨性能也为其材料的改良带来了新的可能。弹性模量是研究材料力学性能的一项重要指标,但目前,不同材料的粉末冶金弹性模量并不能直接在材料数据手册中准确查到^[3]。因此,方便准确地测得粉末冶金材料的弹性模量对粉末冶金乃至农产品加工的发展研究具有重要的现实意义。

金属材料弹性模量的测量方法主要有静态法、动态法2

种^[4-5]。静态法^[6]通过对待测材料受力形变进行测量,进而求出金属弹性模量。拉伸法^[7-9]需测出在外力作用下金属丝发生的微小变形,结合弹性模量公式,计算出金属丝的弹性模量;挠度法^[10-11]测金属悬臂梁的弹性模量,利用悬臂梁挠度与弹性模量之间的理论计算式,测出挠度后间接得到弹性模量,这2种方法都属于用静态法测得材料的弹性模量。动态法属于无损检测,检测结果精确稳定。其中,声速法^[12-13]是基于超声波在材料内部的传播速度和材料的弹性模量的关系计算得出弹性模量。脉冲激振法^[14-17]通过合适的外力给定试样脉冲激振信号,经过对信号的处理分析测出试样的固有频率,计算得出弹性模量。

在上述方法中,拉伸法和挠度法都更适用于弹性变形大的试件,对于粉末冶金这种脆性材料,由于受力后试件产生的弹性形变较小,难以准确测量,导致无法得到准确的弹性模量。本文采用的音频法属于动态法,通过锤击使得杆件试样振动辐射声信号,通过声信号测得杆件的固有频率,进而推算出弹性模量。

1 实验原理

收稿日期 2020-12-18

基金项目 国家重点研发计划项目子课题(编号:2018YFD0400800);科技-中央厨房前处理及餐厨剩余物适时预处理技术装备研发(编号:19000550503)。

作者简介 孙 恰(1997-),女,硕士研究生,研究方向:噪声与振动的研究。

通讯作者 冯 涛,E-mail:fengt@btbu.edu.cn。

弹性模量又称杨氏模量,是弹性材料的一种最重要、最具特征的力学性质,是其变形难易程度的表征,用E表示^[18]。定义为理想材料有小形变时应力与相应应变之比。采用图1所示的实验装置测量棒的弹性模量,两端自由的棒在受到垂直于试件轴线方向上的敲击力时,产生横振动。棒横振动的一阶固有频率和材料弹性模量有对应关系,为得到被测试件的弹性模量,需要测得该材料的圆柱体棒在横振动时的频率。当棒受到敲击激励开始振动时,基频和泛频的振动同时开始,但泛频振动很快衰减,片刻之后便只有基频振动了^[19]。为了测得材料的弹性模量,需先将被测材料制成圆柱体,然后测出其横振动的基频,通过基频计算得到材料弹性模量。

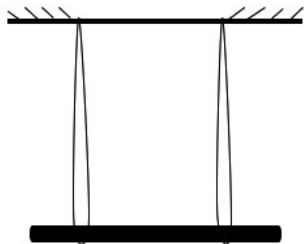


图1 试件的悬挂示意图
Fig.1 The suspension diagram of specimen
两端自由的金属棒做横向振动,其振动方程为^[20-21]:

$$\frac{EI\partial^4 y}{\rho S\partial x^4} + \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0. \tag{1}$$

式中: E ——弹性模量,MPa; I ——横截面对弯曲中性轴的惯性矩, mm^4 ; ρ ——材料密度, kg/mm^3 ; S ——横截面积, mm^2 ; y ——棒在 x 处长为 dx 的体积元的位移, mm ; x ——棒的轴线方向坐标; $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$ ——横向加速度, m/s^2 ; $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ ——曲率。

经推导,被测材料的弹性模量与其制成的两端自由的棒的一阶固有频率之间的关系式^[22]为:

$$E = 1.6067 \frac{l^3 m}{d^4} f^2. \tag{2}$$

公式2中: E ——弹性模量,MPa; l ——棒的总长度,mm; m ——棒的质量,kg; d ——棒的截面直径,mm; f ——棒的横振动的基频,Hz。

金属棒在敲击后产生的音频信号被记录下来,通过信号分析找出自由振荡状态下金属棒的谐振频率,再应用公式2计算得到棒的弹性模量。

2 实验装置与测量

实验用到的装置包括Br ü el & Kjær 3560-B声振信号采集仪、计算机、声传感器、悬挂支架、冲击锤、橡皮筋、低碳钢金属杆件五根、游标卡尺、天平、刻度尺。实验系统,见图2所示。由两部分组成,一部分是金属棒的自由悬挂和敲击装置,另一部分是声信号的采集和处理系统。

将低碳钢杆件两端用橡皮筋悬挂,声传感器置于棒附近。用计算机处理所采集的声信号,分析其自功率谱。实际测量装置和低碳钢杆件受敲击后音频声信号时域波形分别见图3、图4。

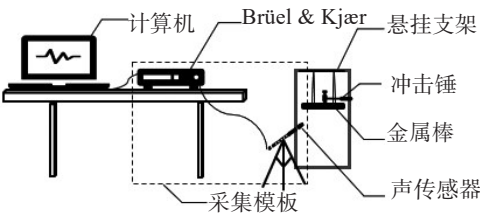


图2 实验装置连接示意图
Fig.2 The schematic diagram of connection of experimental devices



(a)采集装置连接图 (b)激励装置连接图
图3 实际测量装置图

Fig.3 The diagram of actual measuring device

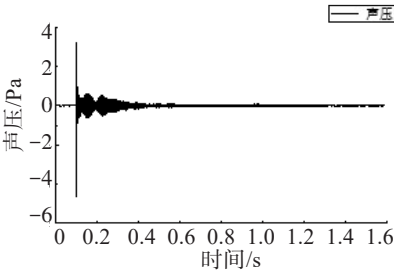


图4 低碳钢杆件受敲击后音频声信号时域波形图
Fig.4 The time domain waveform of audio acoustic signal of low carbon steel rod after being struck

3 测量结果与分析

3.1 低碳钢弹性模量的音频测量方法

图5为所测低碳钢声信号的自功率谱,有明显的共振频率,说明横向振动的测试方法可以很好地检测出材料的固有频率。从频谱图上来看,在800~900 Hz有一峰值,其对应频率就是被测杆件在两端自由的条件下横振动的基频。表1为低碳钢金属杆件所测数据。

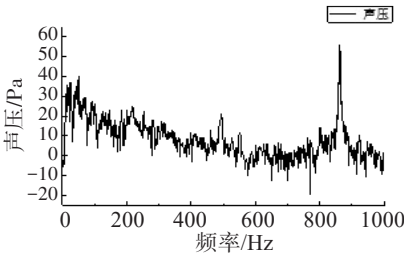


图5 低碳钢杆件音频信号自功率谱
Fig.5 The self power spectrum of low carbon steel rod audio signal

表1 低碳钢杆件测量数据

Tab.1 The measurement data of low carbon steel rod

材质	质量 kg	小直径 mm	大直径 mm	标距 mm	总长度 mm
低碳钢	0.192	10.00	14.00	10.50	209.0

已知被测杆件处于自由振荡下的基频,就可以计算出材

料的弹性模量。将测量得到的峰值频率862.5Hz代入公式2,计算得到低碳钢的弹性模量为209.5 GPa。由拉伸实验测得低碳钢的弹性模量 $E=196\sim 216$ GPa^[23],可知计算结果在真值的合理范围以内。

3.2 低碳钢杆件固有频率的有限元计算

为了验证利用两端自由杆件结构测定材料弹性模量的准确性,进行了有限元模态分析^[24]。通过建立低碳钢杆件的有限元模型,计算其模态参数,得到杆件自由状态下的一阶振动固有频率。比较该频率是否与杆件敲击声信号自功率谱的峰值一致,从而揭示杆件自由弯曲振动的一阶固有频率与声信号频谱峰值的对应关系。

按照表1中的参数建立被测杆件的有限元模型,材料的弹性模量设为209.5 GPa,密度设为8 g/cm³采用六面体网格完成分网,经有限元仿真验证,低碳钢圆杆在自由状态下的一阶固有频率为864.9 Hz,与测量声信号自功率谱的峰值频率862.5 Hz相近。图6为杆件的划分网格示意图,图7为两端自由状态下杆件的模态分析示意图。

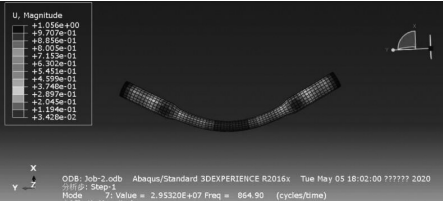


图6 杆件的划分网格示意图

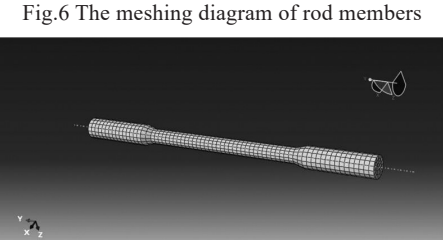


图7 两端自由状态下杆的模态分析示意图

Fig.7 The modal analysis of the rod in the free state at both ends

有限元模态分析结果表明:①杆件受到敲击后辐射的声信号主要来自杆件的自由弯曲振动,其一阶固有频率与声信号的频谱峰值对应的频率值基本吻合;②对杆件辐射声信号进行频谱分析就可对应得到杆件自由弯曲振动的一阶固有频率,再通过其与弹性模量的关系式就可以计算得到材料弹性模量,结果可靠。

3.3 粉末冶金杆件弹性模量的测量

采用粉末冶金工艺制备的钛铝合金具有成分偏析小、组织均匀等优点,是一种极具应用潜力的轻质高温结构材料^[25]。将一种长度为110 mm、直径为8 mm的钛铝粉末冶金材料的圆柱体杆件自由悬挂于支架上,见图3所示,使用音频法测量其弹性模量。图8为某次敲击所测粉末冶金杆件声信号的自功率谱,振动所辐射声信号基频为1 518 Hz。钛铝粉末冶金杆件所测数据见表2,根据公式2计算得到该钛铝粉末冶金杆件的弹性模量值约为81GPa。

表3是对不同材料的同一杆件进行6次不同力敲击得到的基频,可以看出力的大小并不会对测得的频率产生较大的影响。已有研究指出,从不同方向敲击杆件得到的频率是相同的^[26]。因此,用音频法测弹性模量有较好的可行性。该方法可以方便准确地实现粉末冶金材料弹性模量的无损测量,对粉末冶金的研究有一定的借鉴意义。

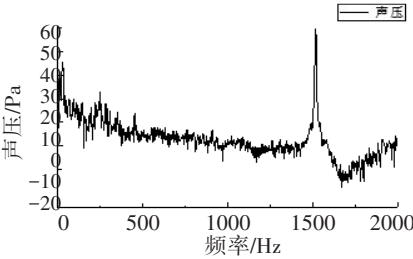


图8 粉末冶金杆件声频信号自功率谱

Fig.8 The power spectrum of audio signal of powder metallurgy rod

表2 钛铝粉末冶金杆件测量数据

Tab.2 The measurement data of titanium aluminum powder metallurgical rod

材质	质量 kg	直径 mm	长度 mm	频 率 Hz
钛铝合金	0.065	10.00	10.00	1518

表3 每次敲击得到的峰值对应频率

Tab.3 The corresponding frequency of the peak value obtained by each knock

材质	敲击次数					
	1	2	3	4	5	6
低碳钢	862.5	862.5	862.5	862.5	863	862.5
钛铝合金	1 518	1 518	1 518	1 520	1 518	1 518

4 结 论

本研究以低碳钢杆件为试验件,对音频法进行验证。有限元模态分析揭示了杆件敲击声信号频谱的峰值频率与杆件一阶固有频率的对应关系。通过音频法测量对应得到低碳钢杆件自由弯曲振动的一阶固有频率,进而计算得到的低碳钢弹性模量与已有结果基本一致。将音频法应用于一种钛铝粉末冶金材料,测得其弹性模量为81 GPa,实现了粉末冶金材料弹性模量的无损测试。

参考文献

[1] 冯振水,刘建华.我国农业机械行业现状分析和前景展望[J].农业技术与装备,2020(7):37-38.
[2] 王锦霞,甘婷婷,张妙,等.莲子去皮方法及其产品开发研究进展[J].农产品加工,2019(14):65-68.
[3] 翟晓杰,赵娜.基于ABAQUS和ANSA材料库进行弹塑性分析的方法及应用[J].农业技术与装备,2014(22):17-19+22.
[4] 宋文远,王文明,潘复生,等.金属基复合材料弹性模量的研究现状[J].材料导报,2006,(S1):416-419.

出得了产地、送得到超市、入得了社区”,从而畅通流通渠道。

3.3 鼓励茶叶经营主体积极利用开展网络营销渠道

增强茶叶营销能力可有效帮助茶农脱贫致富,提高茶叶产业竞争力。通过开辟网络电子商务渠道不仅有助于扩大茶叶销售市场半径,提高茶叶市场份额,促进茶叶销售,还能够避免在疫情爆发背景下人员之间的直接接触,确保疫情防控措施得到有效落实。

3.4 加大茶叶产业支持力度

加大茶叶产业支持力度,为茶叶经营主体提供优惠贷款,增强其生产经营信心。由于疫情影响,多数茶叶经营主体存在产品积压的情况,经营收入出现断崖式下降,资金链受到严重挑战。政府部门要加大茶叶产业扶持力度,指导金融机构针对茶叶经营主体发展茶园经营权抵押贷款业务,并给予一定的贷款贴息支持,以缓解其面临的资金链困境。

3.5 提高茶叶生产机械化水平

农村劳动力持续大规模外出非农就业背景下,机械替代人工是大势所趋,茶叶企业要积极适应机械化发展趋势,在茶叶采摘环节提高机械化应用水平,降低对人工的依赖。同

时,政府部门应组织相关科研机构积极研制先进、高效、适用的茶叶采摘机械,促进茶叶生产机械化水平。

参考文献

- [1] 蒋和平,杨东群,郭超然.新冠肺炎疫情对我国农业发展的影响与应对举措[J].改革,2020(3):5-13.
- [2] 胡晓龙.新冠肺炎疫情对农业农村经济的影响及对策[J].河北金融,2020(3):19-23.
- [3] 李英.新冠肺炎疫情给农业带来的影响[J].农村新技术,2020(3):44-45.
- [4] 张成明.新冠肺炎疫情对农业的影响及对策建议[J].当代县域经济,2020(3):18-21.
- [5] 陈春林,魏国汶,李道和,等.江西省茶产业发展的对策建议[J].江西科学,2019,37(1):136-141.
- [6] 李文金,杨普香,李道和.2018年江西省茶产业发展趋势与建议[J].蚕桑茶叶通讯,2018(2):19-20.
- [7] 刘若,李道和.江西省茶叶产业发展现状与对策分析[J].蚕桑茶叶通讯,2018(2):21-24.
- [8] 梁尧.茶产业扶贫模式研究[J].江西农业,2016(7):94.
- [9] 霍连利.共振法和静态法测定金属杨氏模量的比较[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2015(10):283.
- [10] 余小英,梁冬萍.金属杨氏模量静态测量与动态测量对比研究[J].广西民族师范学院学报,2016,33(3):11-13.
- [11] 李兰兰,张科,高江辉,等.拉伸法测量金属丝弹性模量的试验探讨[J].物理测试,2019,37(5):17-20.
- [12] 蔡莉莉,王会彬.拉伸法测金属丝杨氏模量实验装置的改进[J].大学物理实验,2015,28(1):57-59.
- [13] 徐程林,张远弟,樊则宾.基于千分表的金属丝杨氏模量测量[J].大学物理,2019,38(12):33-35.
- [14] 黄秋红.挠度法测量金属悬臂梁弹性模量[J].科技资讯,2011,(28):67.
- [15] 聂洪波.三点弯曲法测试硬质合金弹性模量[J].粉末冶金材料科学与工程,2010,15(6):606-610.
- [16] 王学水,王硕.基于TDC-GP21的超声波杨氏模量测量装置[J].电子技术,2016,45(7):85-88.
- [17] 魏勤,卫婷,董师润,等.超声波法测量金属材料的杨氏模量和剪切模量[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2012,26(1):27-30.
- [18] 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(12):1556-1560.
- [19] 李永刚,姜海琴,谭丽华,等.脉冲激振式耐火材料高温弹性模量测试仪及其应用[J].耐火材料,2011,45(4):313-315.
- [20] 胡玉勇,吕明,王时英.关于敲击法测量材料固有频率及弹性模量的研究[J].机械工程与自动化,2010(5):88-89+94.
- [21] 吕红明,余卓平,李鹏飞,等.声频法测定材料弹性模量的研究[J].工程塑料应用,2010,38(10):61-63.
- [22] 王玉清.固体杨氏模量的测量[J].物理测试,2007(5):47-48.
- [23] 陈贤隆.用杆的横振动测杨氏模量[J].大学物理,1987(12):31-32.
- [24] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬.声学基础(第二版)[M].南京:南京大学出版社,2001.
- [25] 王龙,李东霞,马红章,等.动态法测量杨氏模量的理论分析与Matlab辅助研究[J].大学物理,2015,34(10):39-42.
- [26] 黄琪莉,钱圳,彭艺,等.动态法测量固体材料的杨氏模量的一种新方法[J].大学物理实验,2018,31(3):25-28.
- [27] 刘鸿文.材料力学I(第四版)[M].北京:高等教育出版社,1979.
- [28] 孟鑫,张丹丹,杨晓楠.烟秆拔秆破碎机机架轻量化设计与动静态特性分析[J].农业技术与装备,2019(10):88+90.
- [29] 史程程.P/M钛铝基合金的热变形行为与等温锻造/扩散连接工艺[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [30] 郭亚,应怀樵.振动参数在铸件无损检测技术中的应用研究[C].北京:航空工业出版社,2001.

(上接第33页)