

基于临界折射纵波的声时差-表面应力关系 获取方法研究

戴玉红^① 牛娜娜^② 刘贺强^① 任慧玲^① 郝小琴^① 孙凡^①

(^①北京工研精机股份有限公司, 北京 101312; ^②北京工业大学, 北京 100124)

摘要: 机床关键零部件应力的存在会加剧其摩擦磨损, 严重影响机床的加工精度和使用寿命, 对结构表面应力的检测显得十分重要。文章探究了超声临界折射纵波的检测原理, 分析各个因素对声时差反射系数的影响规律; 根据被测件材料参数设计了楔形块的角度; 设计加工了 10 个标准实验件, 通过拉伸试验机和超声检测装置分别测得 10 个试件的声时差反射系数; 分析声时差系数不同的原因, 为基于超声波检测表面应力提供了理论与方法支持。

关键词: 超声检测; 临界折射纵波; 表面应力; 声时差; 声弹性系数

中图分类号: TH161 文献标识码: A

DOI: [10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.05.022](https://doi.org/10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.05.022)

Research on acoustic time difference-surface stress relationship acquisition method based on critical refractive longitudinal wave

DAI Yuhong^①, NIU Nana^②, LIU Heqiang^①, REN Huiling^①, HAO Xiaoqin^①, SUN Fan^①

(^①Beijing Precision Machinery & Engineering Research Co., Ltd., Beijing 101312, CHN;

^②Beijing University of Technology, Beijing 100124, CHN)

Abstract: The presence of stress on key parts of the machine tool will aggravate its friction and wear that seriously affect the machining accuracy and service life of the machine tool, and it is very important to detect the stress on the surface of the structure. In this paper, the detection principle of ultrasonic critical refractive longitudinal wave is explored, and the influence of various factors on the reflection coefficient of acoustic jet lag is analyzed. According to the material parameters of the test piece, the angle of the wedge block was designed; Ten standard experimental pieces were designed and processed, and the acoustic time difference reflection coefficient of ten test pieces was measured by tensile testing machine and ultrasonic testing device. The reasons for the different acoustic jet lag coefficients were analyzed, which provided theoretical and methodological support for the detection of surface stress based on ultrasound.

Keywords: ultrasonic testing; longitudinal critically refracted wave; surface stress; sound jet lag; acoustic elastic coefficient

装配过程中常产生较大的装配应力, 其对高端数控机床精度及精度保持性的影响不可忽略。结构件内部存在的附加应力会使装配结构产生变形, 装配过程中多装配界面精度相互影响, 致使装配精度难以控制。此外机床在服役过程中, 附加应力将使装配运动部件的摩擦磨损加剧, 且装配附加应力在振动、冲击与交变载荷下将发生非线性应力释放与重分布, 直接导致整机扭曲变形、机床抗振性降低、

许用切削力和加工精度下降。由此可见, 装配应力是高端数控机床设计与制造过程中极为不利的影响因素, 应力检测技术就显得尤为重要。

应力测量方法按照对检测对象是否造成破坏可分为两大类: 有损检测和无损检测。有损应力检测方法在检测时会对检测对象造成破坏。无损应力检测方法是在不造成破坏的条件下检测应力, 主要包括电阻应变计法、X 射线法、光弹性法、磁弹性法



和超声波法等。

通过测量材料表面应变变量,间接测量材料应力的电阻应变计法只能测量结构件表面的应力,所测应力是单一方向的应力改变量,不能反映应力分布的全貌,而且测量时电阻应变计必须和结构件表面紧密连接^[1]。建立在诺埃曼-麦克斯韦应力-光学定律基础上光弹性法是一种利用光学原理解决力学问题的方法^[2],存在准备工作程序与检测工艺过程复杂及测量效率低等问题。基于 Bragg 定律和 Hooke 定律提出的 X 射线衍射法测量应力的原理是当 X 射线入射到晶体表面,金属材料表面的晶格改变会导致 X 射线的衍射发生变化,根据衍射原理计算出应变,根据应力和应变之间的关系进一步计算出晶体表面的应力,在钢质结构件应力检测时要考虑到很多因素的影响,如结构件表面的粗糙度、结构件材料、衍射面的确定等。此外,X 射线法检测设备复杂,测量深度最多达几十微米,对于钢质结构件内部应力检测的要求是不能满足的。

随着研究的不断深入以及对超声波技术的掌握,基于超声波声弹性效应的应力检测技术日趋成熟。声弹性效应是超声波波速随材料内部应力状态变化而发生变化的一种现象。通过超声波可以实现轴向应力、残余应力、平面应力和接触应力等的测量。孙国峰^[3]证明了金属在弹性变形范围内,轴向所承受的应力和超声波的飞行时间近似呈一阶线性关系。Kelardeh S 等人^[4]将研究结果与前人的研究结果进行比较,发现轴向应力对超声波速的变化有显著的影响。然而,剪切应力的存在会进一步降低波速。Persson E 和 Roloff A^[5]提出了一种超声测量轴向应力方法,测量精度可达 2.9%。但该技术需要专用的精密仪器才能识别出超声波传播过程中的飞行时间差,因此成本很高;且超声波易受工业现场噪声的影响,存在多模态、频散等特性,使得信号处理困难,在实际工业应用中受到一定限制^[6]。

以上基于超声临界折射纵波的检测方法只能检测平面内的平均应力值,无法准确得到声程内的应力分布情况,且超声波声时差-应力的反射系数受多种因素的影响,导致实验的重复性和一致性差,因此研究各因素对声时差反射系数的影响规律以及声时差-表面应力关系显得十分重要。

1 临界折射纵波检测原理

当纵波的传播方向平行于应力方向时,纵波波

速与应力的关系为^[7]:

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left[\frac{\lambda + \mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2m \right] \quad (1)$$

式中: V_{11} 为纵波传播方向与应力方向平行时的波速; σ 为固体中的应力; ρ_0 为被测材料的密度; λ 、 μ 为固体的二阶弹性常数; m 为固体的三阶弹性常数。

$$V_{11} = \left\{ \frac{\lambda + 2\mu}{\rho_0} + \frac{\sigma}{\rho_0 (3\lambda + 2\mu)} \left[\frac{\lambda + \mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2m \right] \right\}^{0.5} \quad (2)$$

由式(2)可知,超声波的传播速度与材料参数 λ 、 μ 、 m 、 ρ_0 以及应力 σ 的大小和方向有关。

当钢构件处于自由状态时,其内部轴向应力为 0,此时临界折射纵波的波速表达式可写成如下形式^[8-9]:

$$\rho_0 V_{L0}^2 = \lambda + 2\mu \quad (3)$$

结合式(1)与(3),可得:

$$V_{11}^2 = V_{L0}^2 (1 + k\sigma) \quad (4)$$

式中: k 为与钢构件二阶和三阶弹性常数有关的系数,其表达式为:

$$K = \frac{4\lambda + 10\mu + 4m}{\mu} + \frac{2l - 3\lambda - 10\mu - 4m}{\lambda + 2\mu} \quad (5)$$

式(5)可进一步简化成如下形式:

$$\sigma = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{V_{11}^2}{V_{L0}^2} - 1 \right) \quad (6)$$

可以看到,钢结构轴向应力是临界折射纵波波速的函数,对式(6)在 $V_{11} = V_{L0}$ 处进行二阶泰勒展开,可得如下形式^[10-12]:

$$\sigma = \frac{2}{k} \cdot \frac{V_{11} - V_{L0}}{V_{L0}} + \frac{3}{k} \cdot \frac{(V_{11} - V_{L0})^2}{V_{L0}^2} \quad (7)$$

尽管临界折射纵波对应力最为敏感,但应力作用下临界折射纵波的波速改变量仍然较小,试验结果表明,100 MPa 应力引起临界折射纵波波速的改变量仅为 1%^[13-14]。在此,采用固定声程法,式(7)可转化为:

$$\Sigma = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{3t_{L0}^2}{t_{11}^2} - \frac{4t_{L0}}{t_{11}} + 1 \right) \quad (8)$$

式中: t_{L0} 为钢结构零应力状态下临界折射纵波的传播声时; t_{11} 为钢结构受力状态下临界折射纵波的传播声时。

对式(8)进一步简化,得:

$$\Sigma = \frac{2}{kt_{L0}} (t_{L0} - t_{11}) \quad (9)$$

令:

$$K = \frac{k}{2} \quad (10)$$

式中： K 为声弹性常数。

声弹性常数应力与声时联系起来，式(9)最终可简化为：

$$\Sigma = B(t_{L0} - t_{11}) \quad (11)$$

其中，

$$B = \frac{1}{Kt_{L0}} \quad (12)$$

式中： B 为应力-声时差系数。

2 超声反射系数实验测量

2.1 试件设计

本节设计了一种长 300 mm，宽 60 mm，厚度为 10 mm 的标准试件，共 10 件，材料为 45 钢，具体尺寸如图 1 所示。

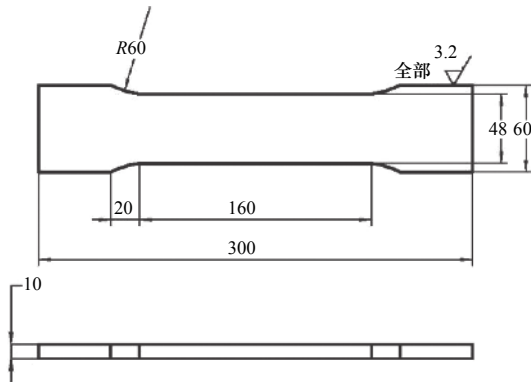


图 1 试件工程图

2.2 声时差-表面应力关系测量实验以及反射系数测量

分别对 10 个试件进行实验测量，实验如图 2 所示，通过拉伸试验机对试件施加一定梯度的载荷 $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ ，分别获得对应的时间差 $\nabla t_1, \nabla t_2, \nabla t_3, \dots, \nabla t_n$ ，通过测量数据拟合得到每个试件的声时差-应力关系曲线，如图 3 所示，计算得到每个试件的超声波反射系数 $B_1, B_2, B_3, \dots, B_{10}$ ，见表 1。



图 2 实验现场

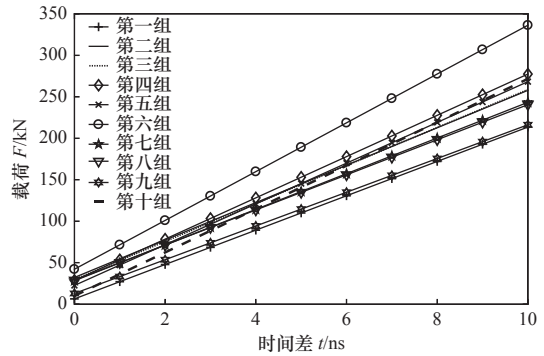


图 3 试件的声时差-应力关系曲线

表 1 各试件的反射系数及常数

组别	1	2	3	4	5
系数	20.715	22.565	22.898	24.884	24.575
常数	6.351	32.153	29.768	28.594	22.538
组别	6	7	8	9	10
系数	29.422	21.512	21.166	20.338	26.166
常数	42.089	28.227	28.884	12.894	10.013

根据超声波声时差-应力模型，探究各因素对反射系数的影响规律，分析试件之间反射系数存在差异的原因，试件反射系数的标准差为 2.71，常数的标准差为 9.52，分析原因主要是由于不确定性广泛存在于机械领域，试件本身的个体差异导致试件材料参数的不均匀性、几何尺寸的误差，同时还有环境温度的变化、噪声的影响。

3 数值分析

根据式(11)绘制图 4 曲线，由图可知，超声波传播的时间差 ∇t 与结构应力值呈线性关系，应力越大传播时间差越大。

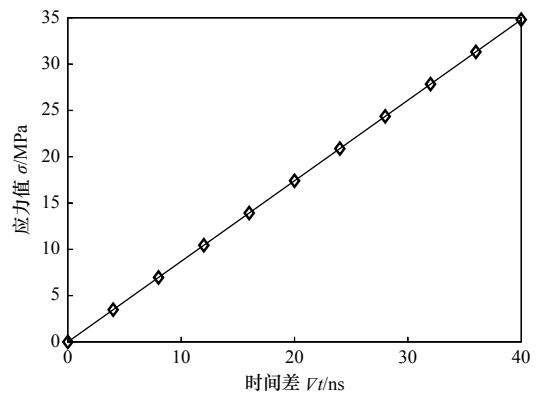


图 4 超声传播时间差-应力关系曲线图

根据表 2 的材料参数绘制图 5 应力-超声波传播速度的关系曲线图，由图可知，且当应力方向与超

声波声束传播方向一致时，超声传播速度随着应力值的增大而减小，且结构钢的应力-超声波传播速度的关系曲线斜率大于45钢的斜率，这是由于应力的会影响组织内部晶粒的排布，从而影响超声波传播速度。

表2 材料的Lame常数和Murnaghan常数 GPa

材料	λ	μ	m
铜	104	46	-372
45钢	120	79	-496

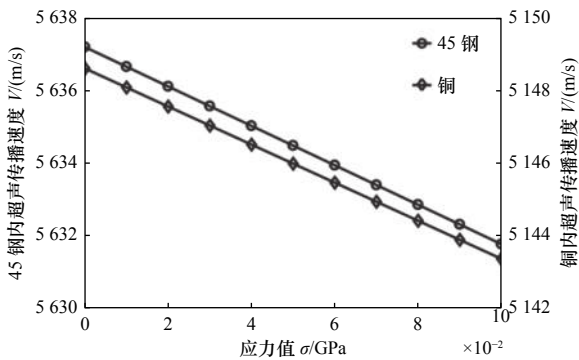


图5 应力-超声波传播速度的曲线关系

4 结语

本文基于超声波声弹性原理探究了各因素对超声波反射系数的影响规律，研究发现，超声波在介质中的传播速度受材料参数、应力大小以及方向的影响，导致超声波在声程内传播的时间有所差异；此外，本文设计了10个标准实验件，通过测量10个试件的超声反射系数，分析10个试件超声反射系数一致性差的原因，主要是由于材料参数不均匀、温度变化、环境噪声等因素导致的个体差异，试件反射系数的标准差为2.71，常数的标准差为9.52。

参 考 文 献

[1] Shakeel M, Khan W A, Rahman K. Fabrication of cost effective and high sensitivity resistive strain gauge using DIW technique[J]. *Sensors and*

Actuators A:Physical, 2017, 258: 123-130.

[2] 谢文广, 周静, 王强. 光弹性法的发展与应用[J]. *现代物理知识*, 2006(3): 34-36.

[3] 孙国峰, 王大为. 双头螺栓断裂失效分析[J]. *金属热处理*, 2016, 41(4): 213-215.

[4] Kelardeh S M, Hosseini S V, Heidari M, et al. An investigation of the effect of bolt tightening stress on ultrasonic velocity in cylinder head and main bearing cap bolts of diesel engine[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021, 43(8): 375.

[5] Persson E, Roloff A. Ultrasonic tightening control of a screw joint: A comparison of the clamp force accuracy from different tightening methods[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of mechanical engineering science*, 2016, 230(15): 2595-2602.

[6] 孙俊博. 基于超声波法的钢构件二维应力检测及温度影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

[7] 何京波. 基于超声波法的钢构件轴向绝对应力检测方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

[8] 马子奇. 基于临界折射纵波声弹效应的平面应力测量理论和方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

[9] 石建刚. 基于临界折射纵波平面应力场应力测量系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

[10] 王俊峰. 超声表面波检测技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.

[11] 徐春广, 宋文涛, 潘勤学, 等. 残余应力的超声检测方法[J]. *无损检测*, 2014, 36(7): 25-31.

[12] 李焕新. 回转体残余应力的超声无损检测方法[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

[13] 田海兵. 细长构件内部残余应力超声无损检测与导波调控方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.

[14] 宋文涛. 残余应力超声无损检测与调控技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.

第一作者: 戴玉红, 女, 1977年生, 本科, 高级工程师, 研究方向为机床机械设计。E-mail: daiyuhong@jcs.gt.cn

通信作者: 郝小琴, 女, 1993年生, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为机床机械设计。E-mail: haoxiaoqin@jcs.gt.cn

(编辑 高扬)
(收修改稿日期: 2022-12-09)

文章编号: 20230527
如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。