

doi: 10.7690/bgzdh.2024.09.015

晶体结构对螺栓声弹性应力测量的影响研究

黄海莹, 韩玉强, 蔡文路, 李明海, 毛勇建, 李 翀, 吴付岗
(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 以 45#中碳钢为对象, 通过不同的热处理工艺加工 3 种不同晶体结构的实验样品, 分析不同晶体结构超声纵波和横波的声弹性效应。试验结果表明螺栓应力测量超声纵波灵敏度优于横波, 材料晶体结构对声弹性的线性度以及重复性影响较大, 并可通过增加应力强化循环次数进行改善, 在制备的 3 种晶体材料中, 以马氏体为主的中碳钢材料最适合于声弹性应力测试。

关键词: 晶体结构; 热处理; 螺栓; 声弹性; 应力测量

中图分类号: TP206 **文献标志码:** A

Influence of Crystal Structure on Acoustoelastic Stress Measurement of Bolts

Huang Haiying, Han Yuqiang, Cai Wenlu, Li Minghai, Mao Yongjian, Li Chong, Wu Fugang
(Institute of General Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China)

Abstract: The acoustoelastic effects of ultrasonic longitudinal and transverse waves in 45 # medium carbon steel with three different crystal structures processed by different heat treatment processes were analyzed. The results show that the sensitivity of ultrasonic longitudinal wave is better than that of transverse wave in bolt stress measurement, and the crystal structure of the material has a great influence on the linearity and repeatability of the acoustoelasticity, which can be improved by increasing the number of stress strengthening cycles. Among the three crystal materials prepared, the medium carbon steel material with martensite is the most suitable for the acoustoelastic stress measurement.

Keywords: crystal structures; heat treatment; bolts; acoustoelasticity; stress measurement

0 引言

螺栓紧固联接被广泛应用于交通、能源、兵工等领域的大型设备和结构, 其预紧力是否合适直接影响结构的稳定性和安全性, 对重要设备设施的螺栓预紧力监测具有重要工程意义。在具体应用中, 通过测量螺栓轴向应力, 进一步计算获得螺栓预紧力, 因此螺栓轴向应力准确测量是关键。基于声弹性理论的螺栓轴向应力测量是一种无损测试方法^[1], 该方法基于固体中声速因应力作用而产生微弱变化的现象, 实现螺栓预紧力的在线原位测量^[2-5]。声弹性应力测量方法受温度、应力分布、材料晶体结构等因素影响, 导致其测量准确度、环境适应性和测量灵敏度一致性等有待进一步提高^[6-7], 其中材料晶体结构的影响最为复杂。对此, 国内外学者也开展了系列的研究工作, 如 Liu 等^[8-9]研究了不同晶体尺寸碳钢材料应力与声速的对应关系, Zhu 等^[10]发现了焊接区域不同组织形貌对声弹性效应的影响。

笔者选用 45#中碳钢为实验对象, 通过热处理获得不同的晶体结构, 实验研究了不同材料晶体结构对声弹性测试的影响, 探讨了不同晶体结构的声弹性测试曲线的线性度以及重复性。

1 声弹性应力测量理论与模型

测试样品采用杆状结构, 从而有效提高单位面积上的应力强度。在杆状两端增加加载装置, 并在两端面贴敷压电陶瓷产生超声波。采用这种模型使得超声传输方向与应力方向一致, 获得最为优化的声弹性效应。结构如图 1 所示。

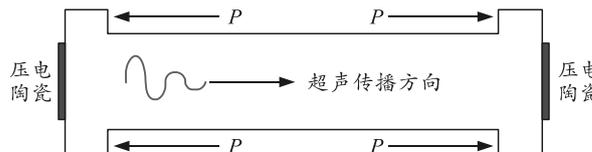


图 1 样品声弹性测量结构

由于声速无法直接获得, 需利用超声路径和超声传播时间获得, 建立传播时差与应力关系, 即时差法测量应力, 测量模型为:

$$\Delta t = t - t_0 = L(k/C_0 + 1/E)\sigma/C_0 \quad (1)$$

式中: 超声纵向穿过样品, L 为超声路径长度既样品长度; t_0 为无应力状态超声传播时间; t 为受力后超声往返时间; C_0 为无应力下的 2 种超声速度; k 为声弹性系数。该模型抵消了系统延迟的影响, 样品的拉伸应力 σ 正比于有、无应力状态下的超声传播时间差 Δt 。

收稿日期: 2024-05-22; 修回日期: 2024-06-22

第一作者: 黄海莹(1973—), 女, 湖南人, 硕士。

2 声弹性应力测量理论与模型

2.1 声弹性应力测量试件准备

实验选用同一批次的 45#中碳钢材料，加工成直径 8 mm、长度 55 mm 的标准杆状拉伸样品，样品两端设计为厚度 5 mm、直径 12 mm 的拉伸实验夹持段。1 号样品加热至 1 035 ℃，等炉温降温；2 号样品加热至 1 035 ℃，空气冷却；3 号样品加热至 1 035 ℃，水冷却，并在 300 ℃保持 2 h，最终获得 3 种不同晶体结构。材料的金相照片和力学性能拉伸实验结果见图 2 和 3。结果表明在 1 号样品中主要成分为晶粒较大的珠光体，在珠光体晶粒间伴有铁素体产生，2 号样品主要结构为晶粒较小的贝氏体，而 3 号样品为晶粒尺寸更小、组织更为错乱的马氏体。由此可见，成功获得了 3 种不同晶体结构的 45#钢样品。从图 3 的拉伸实验测试结果可见，随着应力的增长，以珠光体和铁素体为混合物的 1 号样品在 10 kN 左右首先屈服，以贝氏体为主的 2 号样品在 13 kN 左右发生屈服，而以马氏体为主的 3 号样品在最大拉力为 15 kN 的范围均处于弹

性阶段。

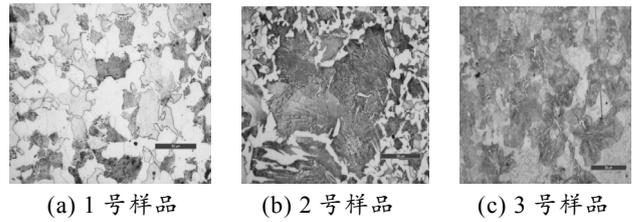


图 2 不同热处理工艺样品的金相观测实验结果

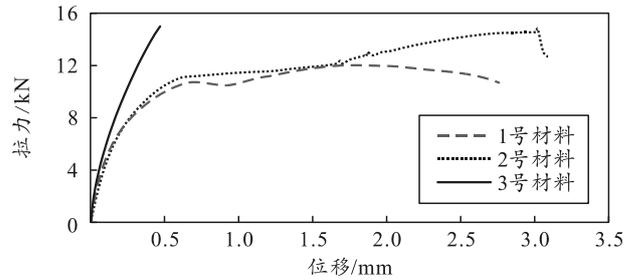


图 3 不同热处理工艺样品的力学拉伸实验结果

2.2 声弹性应力测量实验研究

采用横纵波一体化的超声传感器，搭建试验系统，获取穿过不同应力样品的超声。发射、接收波形和相关运算结果如图 4 所示。

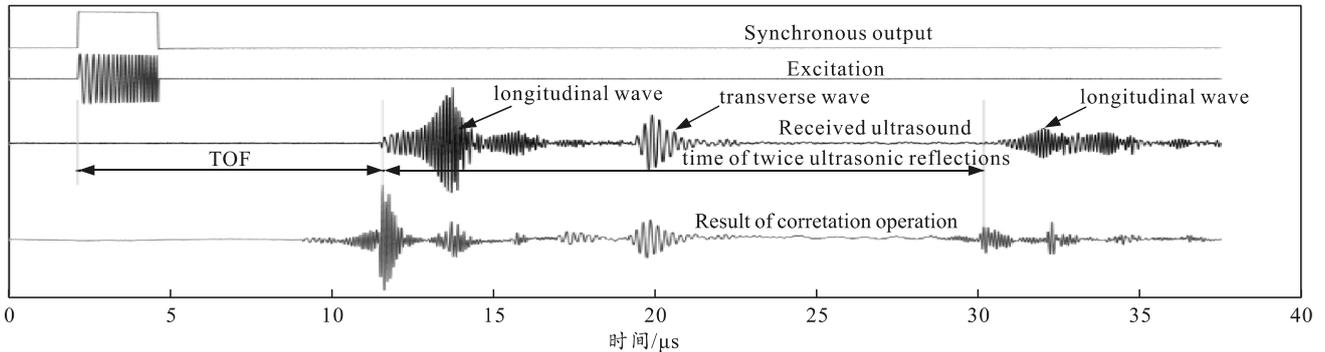


图 4 声弹性测量系统信号时序典型结果

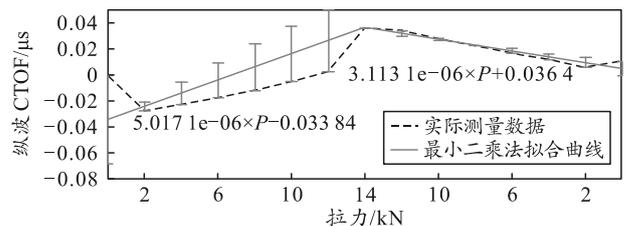
首先被接收的是超声纵波，由于波导效应以及系统频率响应问题，超声纵波包络较发射波产生变形。之后接收到横波，再次接收经过 2 次反射的超声纵波。首次接收超声纵波、起始信号较低，而相关运算在超声起始时刻达到最大值，相关运算可以解决微弱超声波信号的到达时刻计算。

3 结果与讨论

3.1 声弹性曲线的线性度

3 种样品的应力与超声传输时间差如图 5 所示。从图可以看出：3 种样品的超声传输时间均因应力而产生变化，纵波与横波超声传输时间差 (CTOF) 对应力响应保持相同的规律，但纵波的响应灵敏度高于横波；对于 3 种样品的声弹性曲线，应力降低

段的线性度优于应力增加段。产生该现象的原因在于，在应力上升阶段，材料内部不断产生并累计塑性形变，导致传输时间 (TOF) 增加，当应力开始下降后，塑性形变固定，3 种样品按照声弹性规律，即应力与 TOF 呈线性变化，当应力卸载完成，残余的塑性形变导致 TOF 较应力加载前变长。通过对 3 种材料的声弹性曲线的相互比较，1 号样品的应力上升段线性度最差，3 号样品的线性度最优。



(a) 1 号样品在不同应力下的纵波 CTOF

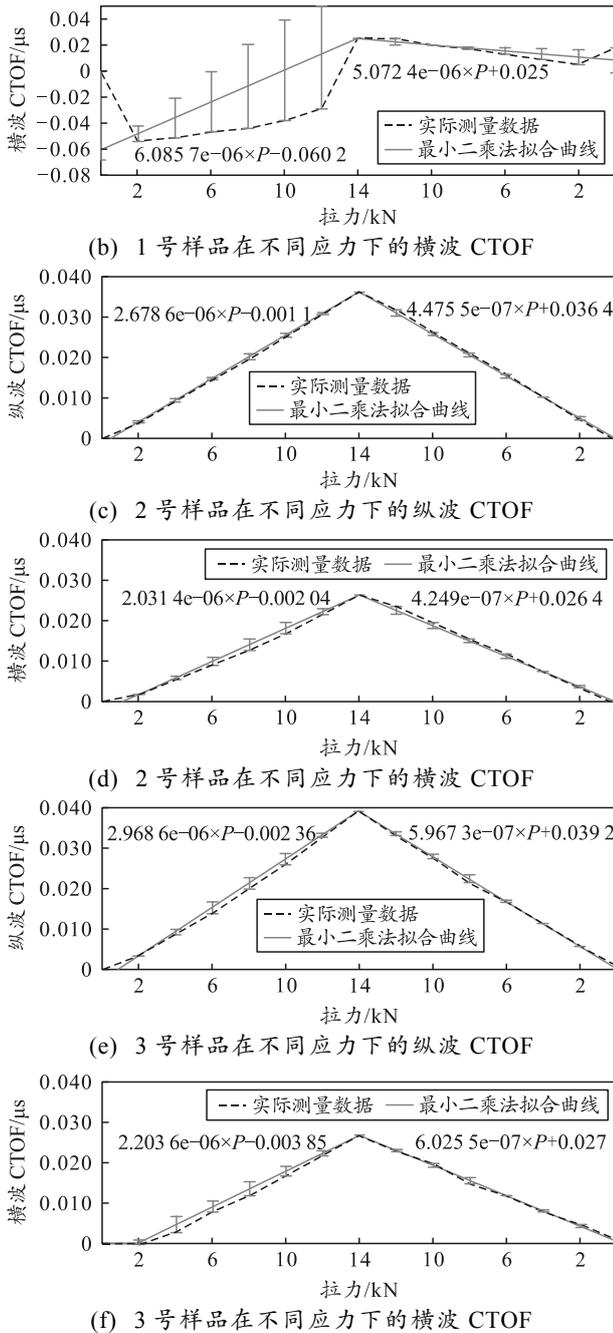


图 5 各样品超声纵波和横波的声弹性测量结果

3.2 声弹性曲线的重复性

为了更为准确的表示塑性形变对 CTOF 的影响，测试应力循环加载对声弹性曲线的影响。图 6 为应力循环加载过程的声弹性测试曲线。从图中可以看出：各样品超声纵波与横波的声弹性曲线在每个应力周期内保持相同的形状，最为明显的 1 号样品，在每次应力归零后，TOF 都会增加，而增量随着循环周期变长而降低，2 到 0 到 2 kN 应力过程中的 TOF 突变、12 到 14 kN TOF 的斜率突变随着循环周期不断减弱。该现象的原因在于随着不断的应

力循环，应力引起的晶界错位、塑性形变等因素逐渐趋于平稳，对声弹性测试的影响降低。

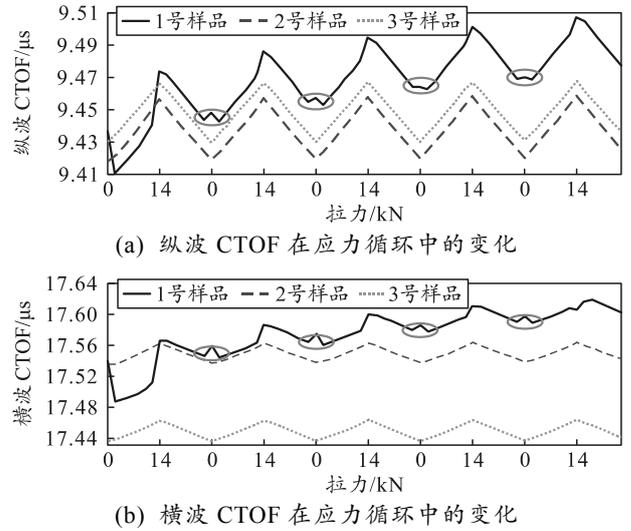


图 6 应力循环加载过程各样品纵波和横波声弹性曲线

图 7 为零应力点处的 TOF 变化，并采用指数拟合对 5 个周期的零应力点 TOF 拟合。从图中可以看出，1 号与 2 号样品的无应力 TOF 随周期呈类指数分布，且 1 号材料的 TOF 变化量最大，3 号样品的 TOF 变化无规律，且每点与首点的差距最大约为 1 ns，已经接近相关运算时间分辨率 0.4 ns。3 号样品的马氏体材料在每次应力循环后，无应力状态的 TOF 没有明显变化。

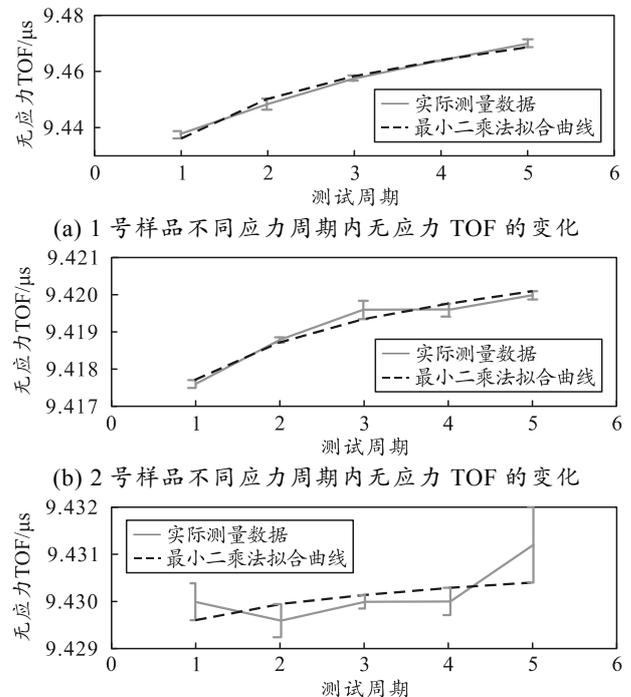


图 7 应力循环加载过程零应力点处各样品 TOF 结果