



中华人民共和国国家标准

GB/T 43232—2023

紧固件 轴向应力超声测量方法

Fasteners—Measurement method of axial stress by ultrasonic

2023-11-27 发布

2024-06-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国紧固件标准化技术委员会(SAC/TC 85)归口。

本文件起草单位：中机生产力促进中心有限公司、北京理工大学、武汉中科创新技术股份有限公司、北京金风科创风电设备有限公司、江苏徐工工程机械研究院有限公司、中车株洲电力机车研究所有限公司风电事业部、北京艾法斯特科技发展有限公司、杭州华新检测技术股份有限公司、北京国电电科院检测科技有限公司、中物院成都科学技术发展中心、浙江海力股份有限公司、晋亿实业股份有限公司、哈电风能有限公司、山东高强紧固件有限公司、中机研标准技术研究院(北京)有限公司、广东省特种设备检测研究院中山检测院、武汉国检检测技术有限公司、明阳智慧能源集团股份公司、航天精工股份有限公司、北京声时科技有限公司、中铁大桥局集团有限公司、苏州博昇科技有限公司、中船重工海为郑州高科有限公司、浙江裕泰汽车配件有限公司、东方电气集团东方电机有限公司、上海泛华紧固系统有限公司、舟山市正源标准件有限公司、上海高强度螺栓厂有限公司、山西省机械产品质量监督检验站有限公司、舟山市 7412 工厂、杭州戩威科技有限公司、河北五维航电科技股份有限公司、湖南中机申亿检测技术有限公司、七丰精工科技股份有限公司、苏交科集团股份有限公司、国家电投集团科学技术研究院有限公司、江苏华杰不锈钢制品有限公司、西北工业大学太仓长三角研究院、西南交通大学、上海兹懋仪器科技有限公司。

本文件由全国紧固件标准化技术委员会负责解释。

引 言

螺栓的轴向应力关系到螺栓连接的可靠性,是螺栓安装和服役过程中需要控制的重要参数,轴向应力过大会引起螺栓断裂,轴向应力过小会引起螺栓连接松动,因此需对螺栓连接的轴向应力进行检测和监测^[3, 4]。工程领域中常用的螺栓紧固轴力检测方法包括力矩法、转角法、应变计法等^[5, 6]。目前,超声法也得到了深入研究和越来越多的应用。

1953年美国田纳西大学的 Hughes 根据有限变形理论,研究了各项同性材料的声弹性,揭示了材料中超声纵波和横波的传播速度对应力敏感的规律,建立了超声波测量应力的声弹性理论^[7]。以声弹性原理为基础,国内外学者对螺栓紧固应力的超声波检测模型和方法进行了大量研究^[8-16]。刘镇清等基于声弹性原理,建立了螺栓轴向应力测量模型^[8]。何存富等研究了温度、扭转剪应力对螺栓轴向应力超声测量的影响规律,并提出了修正方案^[9, 10]。徐春广等对横纵波联合测量螺栓紧固应力的模型进行了研究^[11, 12, 14]。潘勤学等提出了基于形状因子和材料因子的螺栓紧固应力超声检测模型^[13]。

随着超声检测技术的发展,超声法测量螺栓轴向应力的方法在机械工业各领域的应用日益广泛,本文件旨在规范超声法测量螺栓轴向应力的检测流程及相关事项。

紧固件 轴向应力超声测量方法

1 范围

本文件规定了螺栓、螺钉和螺柱轴向应力超声测量方法的原理、仪器、测量、数据处理和测量报告。

本文件适用于螺栓、螺钉和螺柱(以下简称螺栓)在装配过程中或装配后轴向应力的测量,及其在服役状态轴向应力的动态原位监测。

本文件适用的螺栓:

- a) 单波:公称直径不小于 5 mm,双波:公称直径不小于 12 mm;
- b) 长径比不小于 3:1;
- c) 性能等级 8.8 级及以上;
- d) 声学各向同性材料;
- e) 轴向应力范围:(30%~90%) $R_{p0.2}$ 。

注 1:具有特殊结构型式(如长度较短、空心、变径)或几何形状,以及性能等级 8.8 级以下的螺栓,参考本文件进行超声波检测时可能达不到本文件规定的精度要求。

注 2:对于(30%~90%) $R_{p0.2}$ 应力区间范围之外的情况,参考本文件进行超声波测量时可能达不到本文件规定的精度要求。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法

GB/T 16823.3 紧固件 扭矩-夹紧力试验

GB/T 16825.1 金属材料 静力单轴试验机的检验与校准 第 1 部分:拉力和(或)压力试验机测力系统的检验与校准

GB/T 18852 无损检测 超声检验 测量接触探头声束特性的参考试块和方法

GB/T 20935.1 金属材料 电磁超声检测方法 第 1 部分:电磁超声换能器指南

GB/T 38952 无损检测 残余应力超声体波检测方法

JJF(机械) 1056 残余应力超声检测仪校准规范

3 术语和定义

GB/T 16823.3、GB/T 38952 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

标定螺栓 reference bolt

用于建立轴向应力与测量参数间关系,处于自由状态的试验用螺栓,其材料和型式尺寸与被测量螺栓基本一致。

3.2

零应力螺栓 zero stress bolt

利用声束控制法(见 GB/T 38811)或振动时效法(见 GB/T 25712)制备的内应力接近零的标定螺栓(3.1)。

3.3

夹紧长度 clamping length

装配后,螺栓、螺母支承面或机体表面与螺母支承面之间的距离。即:螺栓或螺钉与螺母连接时,螺栓或螺钉头部支承面至螺母支承面之间的距离;螺柱与机体或螺母连接时,两螺母支承面之间的距离或机体表面与螺母支承面之间的距离。

注:螺栓紧固后,产生轴向应力的长度通常按夹紧长度加螺栓头部厚度的一半和螺母高度的一半进行计算。

3.4

声时 time of flight

超声脉冲传播通过某段材料所用的时间。

3.5

声时差 time difference of flight

材料应力变化引起的超声传播时间的变化量。

3.6

应力系数 stress coefficient

表征声时差与材料应力关系的系数。

4 符号

下列符号适用于本文件。

$A_{s,nom}$	螺纹公称应力截面积,单位为平方毫米(mm^2);
F	紧固轴力,单位为牛顿(N);
K_L	紧固件材料的纵波应力系数;
K_S	紧固件材料的横波应力系数;
$R_{p0.2}$	机械加工试件的规定塑性延伸率为0.2%时的应力,单位为兆帕(MPa);
T_L	σ 应力时纵波在紧固件长度内的传播声时,单位为秒(s);
T_{L0}	无应力(自由状态)时纵波在紧固件长度内的传播声时,单位为秒(s);
T_S	σ 应力时横波在紧固件长度内的传播声时,单位为秒(s);
T_{S0}	无应力(自由状态)时横波在紧固件长度内的传播声时,单位为秒(s);
α_S	横波温度系数;
α_L	纵波温度系数;
θ	测量应力状态声时的温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);
θ_0	测量无应力状态声时的温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);
σ	轴向应力,单位为兆帕(MPa)。

5 原理

5.1 物理原理

依据材料声弹性原理和胡克定律,螺栓轴向应力引起的声速变化及螺栓长度变化,共同导致超声波

沿其轴向传播的声时发生变化。因此,可通过单波法或双波法测量螺栓加载前后的声时,计算出螺栓的轴向应力,进而根据螺纹公称应力截面积获得紧固轴力。

5.2 单波法测量原理

单波法通过测量单一波型的超声脉冲在螺栓施加应力前和施加应力后沿其轴向传播的声时,间接测量轴向应力,见图 1。

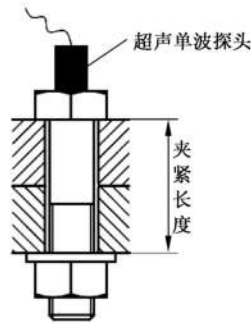


图 1 单波法测量原理示意图

以纵波为例,螺栓的轴向应力变化与纵波沿螺栓轴线方向的传播声时变化之间的关系见公式(1):

$$\sigma = K_L \frac{T_L - T_{L0}}{T_{L0}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

通过标定螺栓的纵波应力系数 K_L , 测量被测螺栓无应力状态下超声纵波在其中的传播声时 T_{L0} , 测量被测螺栓 σ 应力状态下超声纵波在其中的传播声时 T_L , 即可由公式(1)计算得到螺栓中的轴向应力 σ 。

5.3 双波法测量原理

双波法通过测量纵波和横波两种波型超声脉冲沿螺栓轴向传播的声时,间接测量轴向应力,见图 2。

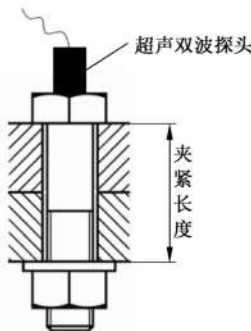


图 2 双波法测量原理示意图

由螺栓的轴向应力变化与纵波、横波声速变化之间的关系,可得螺栓的轴向应力变化与纵波、横波在螺栓中传播声时变化的关系,见公式(2):

$$\sigma = \frac{(T_S / T_L) - (T_{S0} / T_{L0})}{1 / K_S (T_{S0} / T_{L0}) - 1 / K_L (T_S / T_L)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

通过标定螺栓材料的纵波应力系数 K_L 和横波应力系数 K_S , 及无应力状态下超声纵波在螺栓中的传播声时 T_{L0} 和超声横波在螺栓中的传播声时 T_{S0} , 实测时, 利用仪器测量 σ 应力状态下超声纵波在螺栓中的传播声时 T_L 和超声横波在螺栓中的传播声时 T_S , 即可由公式(2)计算得到螺栓中的轴向应

力 σ 。

可根据测量和精度要求,在公式(2)基础上进行修正和补偿。

6 仪器

6.1 一般要求

螺栓轴向应力超声测量仪器应至少包括体波检测探头、螺栓轴向应力超声体波检测仪和温度传感器,如图 3 所示。

系统测量误差应不大于 $\pm 5\%$ 。

螺栓轴向应力超声体波检测仪应定期进行综合性能校准,以确认其测量准确性,校准间隔最长不应超过一年,且校准时,应按 JJF(机械) 1056 的规定执行。

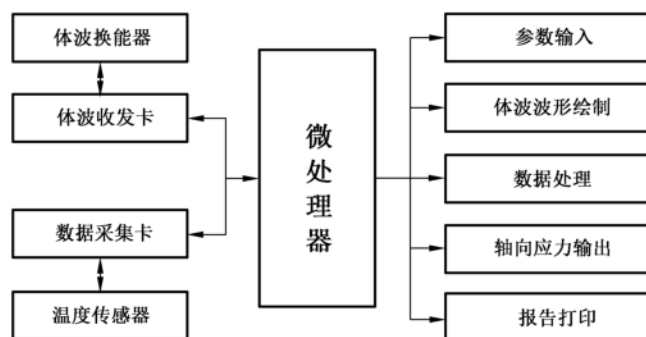


图 3 螺栓轴向应力超声体波测量仪器组成示意图

远程监测系统相关信息见附录 A。

6.2 体波检测探头

体波检测探头满足以下要求:

- 体波检测探头应能实现超声横波和/或纵波的发射和接收,根据被检测螺栓的材质、尺寸、表面轮廓、夹紧长度等需求,选定体波换能器的中心频率、声束截面积等探头参数;
- 压电式超声体波换能器和声楔块的材料选定和制备应符合 GB/T 18852 的规定;
- 电磁超声体波换能器的选定和制备应符合 GB/T 20935.1 的规定;
- 检测和标定宜采用相同的体波检测探头;
- 压电式超声体波换能器接触面与被检测螺栓表面应贴合良好,实现有效的超声波传播。

6.3 螺栓轴向应力超声体波检测仪

螺栓轴向应力超声体波检测仪应包含温度传感器接口,并具有温度补偿功能。

时间测量分辨率应优于被测螺栓应力从无应力达到 70% 屈服强度时的声时增量的 1/100。超声检测频率应介于 2 MHz~10 MHz 之间。在满足精度的情况下,可采用本文件规定范围以外的频率。

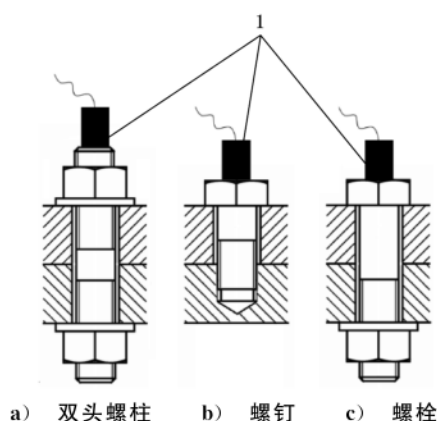
6.4 温度传感器

温度传感器能够在检测温度范围内准确测量被检测螺栓的温度,且温度测量精度满足 Pt100 热电阻 A 级或能达到相应精度等级。温度传感器应定期进行校准。

7 测量

7.1 测量位置

通常在螺栓、螺钉或螺柱端面的中间部位进行测量(见图4),可由用户提出要求,或由供需双方约定。



标引序号说明:

1——紧固件端面的测量部位。

图4 测量位置示意图

7.2 试件

检测表面和反射面应平整,检测时应可获得清晰的横波和/或纵波的回波。可在试件端面中间位置植入压电元件。

7.3 耦合剂

检测过程中如使用耦合剂,以保证在工作温度范围内探头与构件表面具有稳定可靠的声耦合,则体波的声时测量、应力系数标定和无应力声时测量过程使用的耦合剂应保持一致。

采用压电超声双波法时,耦合剂应能稳定耦合横波的传导。

7.4 标定

7.4.1 标定螺栓

标定螺栓的材料、型式尺寸和夹紧长度应与被测螺栓基本一致,长度误差应在1.0%以内,宜选用同厂家、同批次的同规格螺栓。

有特殊要求时,可按GB/T 38811规定的声束法或GB/T 25712规定的振动时效法制备零应力螺栓,或通过弹性阶段重复拉伸多次的简易方法制备零应力螺栓作为标定螺栓。

当不能采用螺栓实物进行标定时,可采用机加工拉伸试件进行应力系数的标定,试件制备和标定方法由供需协议。

7.4.2 标定程序

7.4.2.1 应力系数标定

螺栓应力系数标定条件应与被测螺栓装配状态保持一致。

在环境温度 10 °C ~ 35 °C 条件下,使用符合 GB/T 16825.1 的拉力试验机,在轴向应力 (30% ~ 90%) $R_{p0.2}$ 范围内对标定螺栓按照 GB/T 228.1 规定的方法进行拉力试验,均布不少于 5 个测量点,测量超声传播声时和拉力值,根据各测量点拉力值、螺纹公称应力截面积 $A_{s,nom}$ 计算轴向应力。宜使用 3 支标定螺栓的声时与轴向应力试验数据,得到应力-声时差标定曲线,拟合得出应力系数。

7.4.2.2 无应力状态声时比标定

对双波法,测量标定螺栓无应力状态下纵波和横波传播声时 T_{L0} 及 T_{S0} ,计算得到无应力状态声时比(或其他声特征量),至少测量 5 支标定螺栓,取平均值。若声时比变异系数大于 0.000 25,应增加标定螺栓数量,直至变异系数不大于 0.000 25。

注: 变异系数=标准偏差/平均值。

7.4.3 应力系数选用

如供需双方同意,被测螺栓的应力系数可以从供需双方认可的应力系数数据库中直接选用。

7.5 测量程序

7.5.1 单波法测量程序

单波法测量按下列程序进行:

- a) 测量螺栓无应力状态下超声纵波/横波在其长度内的传播声时 T_{L0}/T_{S0} ,体波检测探头放置的端面位置应与标定应力系数时保持一致;
- b) 测量螺栓应力状态下超声纵波/横波在其长度内的传播声时 T_L/T_S ,探头放置的端面位置应与标定应力系数和测量 T_{L0}/T_{S0} 时保持一致;
- c) 根据应力系数、温度补偿系数和测得的纵波/横波传播声时 T_{L0}/T_{S0} 及 T_L/T_S ,计算出应力状态下螺栓的轴向应力和紧固轴力。

7.5.2 双波法测量程序

双波法测量按下列程序进行:

- a) 测量螺栓应力状态下超声纵波在其长度内的传播声时 T_L 和超声横波在其长度内的传播声时 T_S ,探头放置的端面位置应与标定应力系数时保持一致;
- b) 根据应力系数、温度补偿系数、无应力状态声时比(或其他声特征量),和测量得到的纵波及横波传播声时 T_L 及 T_S ,计算出应力状态下螺栓的轴向应力和紧固轴力。

当测量精度要求较高时,应测量被测螺栓无应力状态下超声纵波在其长度内的传播声时 T_{L0} 和超声横波在其长度内的传播声时 T_{S0} 。

7.6 误差补偿

7.6.1 温度补偿

当标定温度和实测温度不同时,应进行温度补偿。

单纵波法螺栓应力测量的温度补偿可按公式(3)计算:

$$\sigma = K_L \frac{[T_L(\theta) - \alpha_L(\theta - \theta_0)] - T_{L0}}{T_{L0}} \dots\dots\dots (3)$$

双波法螺栓应力测量的温度补偿可按公式(4)计算:

$$\sigma = \frac{[T_S(\theta) - \alpha_S(\theta - \theta_0)]/[T_L(\theta) - \alpha_L(\theta - \theta_0)] - (T_{S0}/T_{L0})}{1/K_S(T_{S0}/T_{L0}) - 1/K_L\{[T_S(\theta) - \alpha_S(\theta - \theta_0)]/[T_L(\theta) - \alpha_L(\theta - \theta_0)]\}} \dots\dots\dots (4)$$

7.6.2 形状因子补偿

螺栓的夹紧长度与其总长度是不同的,长度的差异与螺栓形状和螺母位置有关,这种长度差异称为螺栓连接的形状因子,会影响轴向应力超声测量的精度,应对螺栓连接的形状因子进行补偿。可根据测量和精度要求,确定形状因子的计算和补偿方法。

8 数据处理

由单波法或双波法测得螺栓连接的轴向应力后,可按公式(5)根据螺栓承受轴向载荷的螺纹公称应力截面积计算得到螺栓连接的轴向预紧力或紧固力。

$$F = \sigma \cdot A_{s, \text{nom}} \dots\dots\dots (5)$$

9 测量报告

在螺栓轴向应力测量过程中,可以手动或自动记录测量结果,生成测量报告,报告应至少包括以下内容:

- 本文件编号;
- 检测单位;
- 仪器型号;
- 检测人员;
- 检测日期;
- 检测环境温度、湿度;
- 被测螺栓温度;
- 螺栓材料;
- 螺栓规格;
- 螺栓端面表面粗糙度;
- 螺栓安装位置;
- 检测位置;
- 超声体波检测探头中心频率;
- 螺栓轴向应力数值等。

附录 A
(资料性)
远程监测系统

A.1 功能及构成

A.1.1 总则

远程监测系统至少包括现场检测系统、网络服务系统和远程监视系统,如图 A.1 所示。

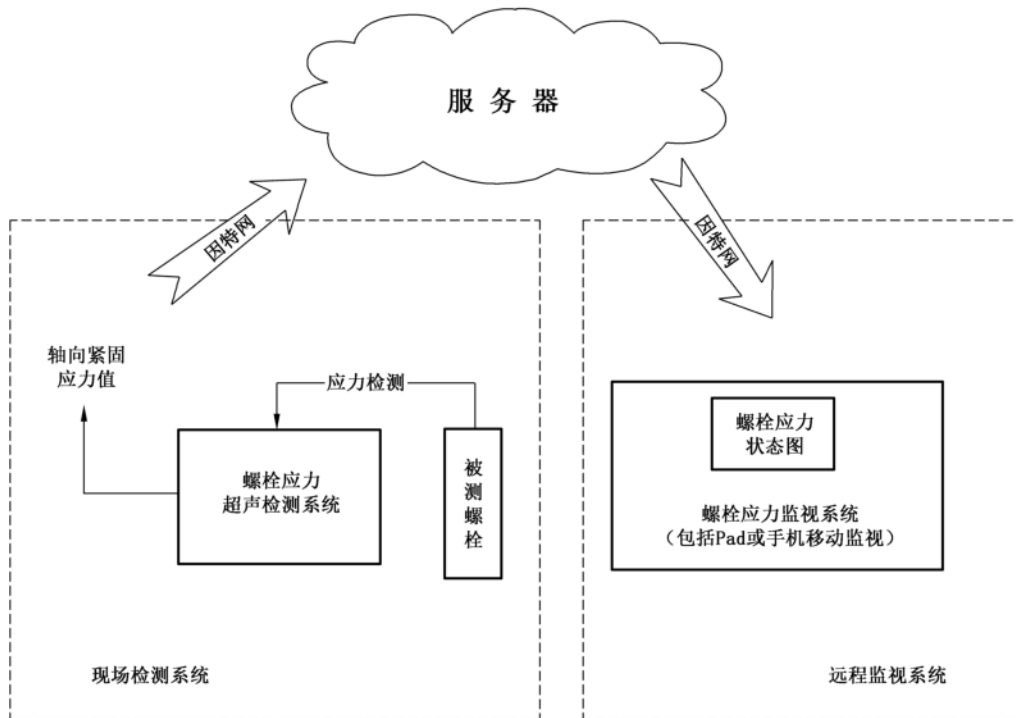


图 A.1 螺栓服役应力超声体波监测系统示意图

A.1.2 现场检测系统

现场检测系统可按照设定的间隔时间,对螺栓的轴向应力进行循环检测和实时监测,利用因特网或指定协议将每次检测得到的应力值实时地上传至网络服务系统中,为远程监视系统提供数据源。

A.1.3 网络服务系统

网络服务系统主要起枢纽的作用,用于实现现场检测与远程监视之间的连接,既可将现场检测的螺栓轴向应力值保存到服务器,也可将服务器的数据传输到远程监视系统本地。

A.1.4 远程监视系统

远程监视系统,首先利用因特网,将网络服务系统中的螺栓轴向应力值实时下载到本地;其次对其进行数据处理,实时呈现螺栓的轴向应力状态图;最后通过分析,将被测螺栓当前的工作状态准确评估并反馈给现场。

A.2 远程监测流程

A.2.1 监测位置

被监测的螺栓点位由用户提出,或由合同双方商定。

A.2.2 监测流程

按下列流程进行监测。

- a) 使用现场检测系统,进行螺栓紧固应力的现场检测。在现场检测系统中设定监视检测的时间间隔,启动螺栓轴向应力的循环检测和实时监测,并将检测得到的螺栓轴向应力值实时上传至网络服务系统。
- b) 开启现场检测系统和远程监视系统的网络服务,使两系统之间可进行数据传输,同时打开远程监视系统的专用软件,等待接收数据。
- c) 开启远程监视系统专用软件,实现被监测螺栓轴向应力的实时动态显示,并对比分析当前轴向应力与被测螺栓强度之间的关系,对工作异常(服役应力过高、过低或异常突变等)的螺栓给出预警提示。

参 考 文 献

- [1] GB/T 25712 振动时效工艺参数选择及效果评定方法
- [2] GB/T 38811 金属材料 残余应力 声束控制法
- [3] Masdar A, Suhendro B, Siswosukarto S, et al. Influence of Bolt Tightening's Force to the Strength of Connection System of Bamboo Truss Structure with Wooden Clamp[J]. *Procedia Engineering*, 2017,171:1370-1376.
- [4] 侯世远, 廖日东. 螺纹联接松动过程的研究现状与发展趋势[J]. *强度与环境*, 2014,2(41):39-52.
- [5] 张亮亮, 王玉林. 扭矩法与扭矩/转角法预紧力的计算及对比研究[J]. *内燃机与配件*, 2016(01):7-8.
- [6] 吴国志. 螺栓紧固应力与紧固扭矩计算[J]. *内燃机与动力装置*, 2012(1):39-41.
- [7] S H D, L K J. Second Order elastic deformation of solids[J]. *Physics Review*, 1953,5(92):1145-1149.
- [8] 刘镇清, 王路. 用超声波技术测量螺栓轴向紧固应力[J]. *测试技术学报*, 1997,1(11):32-37.
- [9] 何存富, 吴克成. 温度对螺栓紧固应力超声测量的影响研究[J]. *实验力学*, 1992(3):21-27.
- [10] 何存富, 吴克成. 扭转剪应力对螺栓紧固应力声弹性测量的影响研究[J]. *固体力学学报*, 1992,4(13):337-342.
- [11] 徐春广, 李骁, 潘勤学, 等. 螺栓拉应力超声无损检测方法[J]. *应用声学*, 2014,33(2):102-106.
- [12] 徐春广, 李焕新, 王俊峰, 等. 残余应力的超声横纵波检测方法[J]. *声学学报*, 2017,2(42):195-204.
- [13] 潘勤学, 邵唱, 肖定国, 等. 基于形状因子的螺栓紧固力超声检测方法研究[J]. *兵工学报*, 2019,4(40):880-888.
- [14] Pan Q, Pan R, Chang M, et al. A shape factor based ultrasonic measurement method for determination of bolt preload[J]. *NDT & E International*, 2020,111:102210.
- [15] Sayed A. Nassar, Aditya B. Veeram. Ultrasonic Control of Fastener Tightening Using Varying Wave Speed[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology AUGUST 2006*, Vol. 128(3):427-432.
- [16] Salim Chaki, Gilles Corneloup, Ivan Lillamand, Henri Walaszek. Combination of Longitudinal and Transverse Ultrasonic Waves for In Situ Control of the Tightening of Bolts[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology AUGUST 2007*, Vol. 129(3):383-390.
-