



中华人民共和国国家标准

GB/T ××××—202×

紧固件 轴向应力超声测量方法

Fasteners — Detecting method of axial stress by ultrasonic

(征求意见稿)
2022-9-19

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

202×-××-××发布

202×-××-××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。

本标准由国家机械工业联合会提出。

本标准由全国紧固件标准化技术委员会（SAC/TC 85）归口。

本标准起草单位：中机生产力促进中心有限公司等。

本标准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^[1, 2]。工程领域中常用的螺栓紧固轴力检测方法包括力矩法、螺母转角法、应变计法等^[3, 4]。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^[5-14]。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]。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^[5, 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，本文件将对超声法测量螺栓紧固应力的检测流程及相关事项进行统一规范。

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（以下简称螺栓）轴向应力超声检测方法的术语和定义、代号、原理、仪器、程序、数据处理和报告。

本文件适用于螺栓、螺钉和螺柱在装配过程中或装配后轴向应力的测量和紧固状态评价，以及螺栓、螺钉和螺柱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 $\geq 5\text{mm}$ ，双波：公称直径 $\geq 12\text{mm}$ ；
- b) 推荐长径比 $\geq 3:1$ ；
- 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%） $R_{p0.2}$ （螺栓材料屈服强度）。

注1：由于具有特殊结构型式（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、螺钉或螺柱，可参考本文件执行，但在进行超声波检测时可能达不到本文件规定的测量精度要求。

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

远程测量系统相关信息见附录A。

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 3098.1 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱

GB/T 12604.1 无损检测 术语 超声检测

GB/T 16823.3 紧固件 扭矩-夹紧力试验

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 25712 振动时效工艺参数选择及效果评定方法

GB/T 38811 金属材料 残余应力 声束控制法

GB/T 20935.1—2018 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

JJG 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中界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

零应力螺栓 zero stress bolt

利用高能声束控制法(GB/T 38811)或振动时效法(GB/T 25712)制备的内应力接近0的标定螺栓。

3.2

标定螺栓 reference bolt

用于建立测量轴向应力与测量参数关系,处于自由状态的试验用螺栓,材料和型式尺寸应与被测量螺栓基本一致。

3.3

长度变化 change in length 仅3.8使用

由于轴向拉力变化导致的螺纹紧固件长度的物理变化。

3.4

参考长度 reference length 正文中未使用

试样中的超声波飞行时间乘以参考传播速度。

3.5

有效长度 effective length 正文中未使用

对应力作出响应的紧固件长度,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。

3.6

纵波 longitudinal wave

传播方向与材料质点的振动方向相同的波。

3.7

横波 transverse wave

传播方向与材料质点的振动方向垂直的波。

3.8

超声体波 bulk wave

纵波的偏振方向与传播方向平行的纵波和偏振方向与传播方向垂直的横波。

[来源:GB/T 38952-2020, 3.1]

3.9

参考传播速度 reference propagation velocity 仅3.4一处使用

超声波波前在校准试块或测量其长度变化的螺栓中的传播速度。

3.10

声时 time of flight

超声脉冲传输通过某段材料所用的时间。

3.11

声时差 time difference of flight

材料应力变化引起材料中超声传输延时的相对变化量。

3.12

应力系数 stress coefficient

表征声时差和材料应力关系的系数。

4 代号

下列代号适用于本文件。

$A_{s, nom}$ 螺栓公称应力截面积，单位为平方毫米（mm²）；

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；

T_L σ 应力时纵波在紧固件长度内的传播时间，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时间，单位为秒（s）；

T_S σ 应力时横波在紧固件长度内的传播时间，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时间，单位为秒（s）；

σ 螺栓连接夹紧段的轴向应力，单位为兆帕（MPa）。

5 原理

5.1 物理原理

依据材料的声弹性原理，螺栓的轴向应力会引起超声波传播速度的变化，对于长度确定的螺栓连接，轴向应力变化将使超声波在其轴线方向的声时发生变化。因此，可通过测量超声波在螺栓中的声时计算出对螺栓施加的轴向应力，从而根据螺栓的应力截面积算出螺栓连接的紧固轴力。

5.2 单波法测量原理

单波法采用测量一种波型（例如纵波）的超声脉冲沿螺栓轴向传输的施加应力前和施加应力后的声时差，间接测量轴向应力，见图 1。

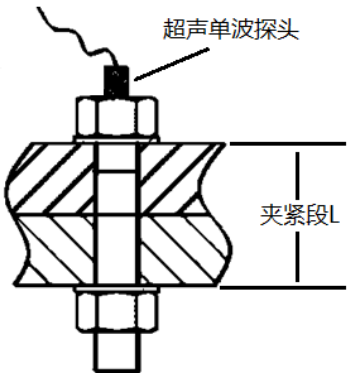


图 1 单波法测量原理示意图

螺栓的轴向应力变化与纵波沿螺栓轴线方向的传播时间变化之间的关系见式（1）：

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

由式（1）式可知，利用超声纵波可以测量螺栓的轴向应力。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螺栓中的传播时间 T_{L0} ，测量被测螺栓 σ 应力状态下超声纵波在螺栓中的传播时间 T_L ，即可由式（1）计算得到螺栓中的轴向应力 σ 。

5.3 双波法测量原理

双波法采用同时测量两种波型（例如纵波和横波）超声脉冲沿螺栓轴向传输的声时，间接测量轴向应力，见图2。

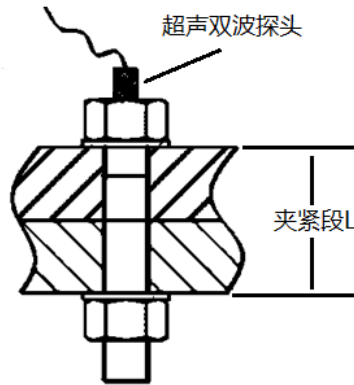


图2 双波法测量原理示意图

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、横波在螺栓中传播时间变化的关系见公式（2）：

$$\sigma = \frac{(T_s / T_L) - (T_{s0} / T_{L0})}{\frac{1}{K_s} (T_{s0} / T_{L0}) - \frac{1}{K_L} (T_s / T_L)} \quad (2)$$

由式（2）可知，同时利用超声纵波和横波可以测量螺栓的轴向应力。通过标定螺栓材料的纵波应力系数 K_L 和横波应力系数，及无应力状态下超声纵波在螺栓中的传播时间 T_{L0} 和超声横波在螺栓中的传播时间 T_{s0} ，实测时，只需利用仪器测量 σ 应力状态下超声纵波在螺栓中的传播时间 T_L 和超声横波在螺栓中的传播时间 T_s ，即可由式（2）计算得到螺栓中的轴向应力 σ 。

可根据测量和精度要求，在式（2）基础上自行修正和补偿。

6 仪器

6.1 一般要求

用于本文件规定的轴向应力测量方法的测量仪器如图3所示，应包括体波检测探头、螺栓轴向应力超声体波检测仪和温度传感器。

系统测量误差： $\leq \pm 5\%$ 。

需要定期对螺栓轴向应力超声体波检测仪进行综合性能校准，以确认其测量数值的准确性，校准间隔最长不超过一年。校准规程按JJG 1056规定。

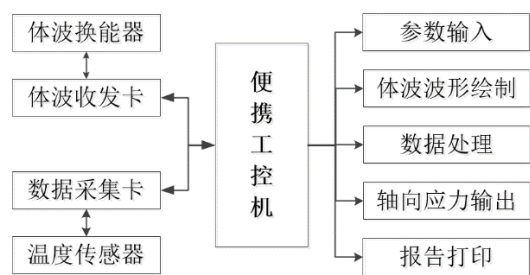


图3 螺栓轴向应力超声体波测量仪器

6.2 体波检测探头

- a) 体波检测探头应能实现超声横波和/或纵波的发射和接收，根据被检测材料的材质、尺寸、表面形廓、检测区域及服役应力的检测长度 (*l*) 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。
- b) 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。
- c) 电磁超声体波换能器的选定和制备应符合GB/T 20935.1。
- d) 检测和标定用的服役应力体波检测探头应尽可能一致。
- e) 压电式超声体波换能器接触面与被检测构件表面良好贴合，实现有效的超声波传递。

6.3 螺栓轴向应力超声体波检测仪

轴向应力超声体波检测仪的作用是激励体波检测探头，得到并接收体波回波信号，通过测量超声体波传播时间计算得到对应的螺栓轴向应力值。

测量装置应包含温度补偿接口。

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2MHz~10MHz之间。在满足测量精度的情况下，可采用本文件规定范围以外的频率。

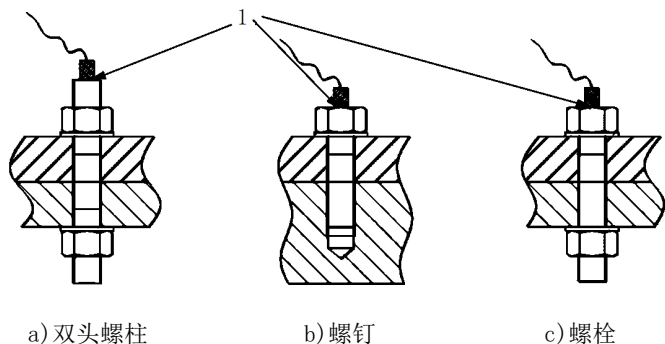
6.4 温度传感器

要求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A级以上。温度传感器应定期进行校准。

7 测量

7.1 测量位置

通常在紧固件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 试件准备

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、型式尺寸和夹持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规定的高能声束法或按GB/T 25712规定的振动时效法制备零应力螺栓，或通过在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。

大规格螺栓可采用机加工拉伸试样进行应力系数的标定，试样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℃~35℃）下，使用符合 GB/T 16825.1 的拉力试验机，在材料弹性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，测量不少于 5 点，均布在轴向应力（30%~90%） $R_{p0.2}$ 范围内。宜使用 3 支标定螺栓的声时与轴向力试验数据，根据各测量点拉力值、螺栓公称应力截面积 $A_{s,nom}$ 计算轴向应力，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时间 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>0.00025，应增加标定螺栓数量，直至变异系数≤0.00025。

注：变异系数=标准偏差/平均值。

7.4.3 应力系数数据库

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提取。

7.5 测量程序

7.5.1 单波测量程序

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时间 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时间 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/横波传播时间 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 双波测量程序

a) 测量螺栓应力状态下超声纵波在其长度内的传播时间 T_L 和超声横波在其长度内的传播时间 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时间 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时间 T_{L0} 和超声横波在其长度内的传播时间 T_{S0} 。

7.6 误差补偿

7.6.1 温度补偿

当标定和实测温度不同时,应进行温度补偿。

单纵波法螺栓应力测量的温度补偿可按式(7)计算:

$$\sigma = K_L \frac{[T_L(\theta) - \alpha_L(\theta - \theta_0)] - T_{L0}}{T_{L0}} \quad (7)$$

式中:

θ_0 ——测量无应力状态声时的温度,单位为摄氏度(℃);

θ ——测量应力状态声时的温度,单位为摄氏度(℃)。

双波法螺栓应力测量的温度补偿可按式(8)计算:

$$\sigma = \frac{[(T_S(\theta) - \alpha_S(\theta - \theta_0)) / [(T_L(\theta) - \alpha_L(\theta - \theta_0)) - (T_{S0}/T_{L0})]}{\frac{1}{K_S}(T_{S0}/T_{L0}) - \frac{1}{K_L}\{[(T_S(\theta) - \alpha_S(\theta - \theta_0)) / [(T_L(\theta) - \alpha_L(\theta - \theta_0))]\}} \quad (8)$$

式中:

α_S ——横波温度系数;

α_L ——纵波温度系数。

7.6.2 形状因子补偿

螺栓连接仅在夹持长度内产生轴向应力,螺栓的夹持长度与其总长度往往是不同的,长度的差异与螺栓形状和螺母位置有关,这种长度差异常称为螺栓连接的形状因子,应对螺栓连接的形状因子进行补偿。

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，可按式（9）根据螺栓承受轴向载荷的有效应力截面积计算得到螺栓连接的轴向预紧力或紧固力。

$$F = \sigma \cdot A_{s, \text{nom}} \quad (9)$$

式中：

F ——紧固轴力；

σ ——轴向应力；

$A_{s, \text{nom}}$ ——螺栓公称应力截面积。

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检测结果，生成测量报告，报告至少应包括以下内容：

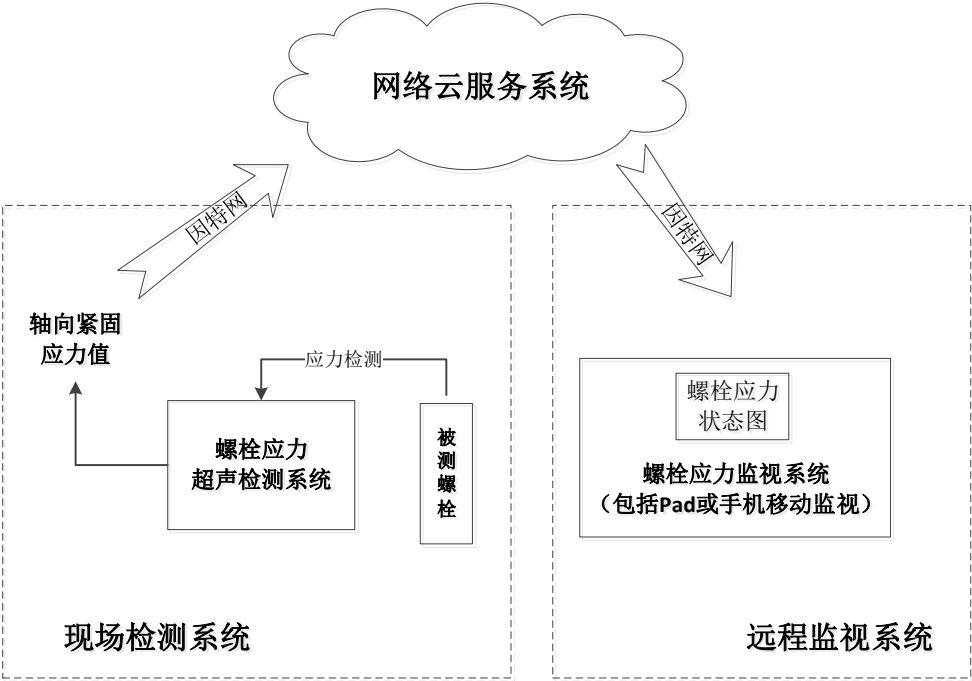
- 检测单位；
- 仪器型号；
- 人员；
- 日期；
- 检测环境温、湿度；
- 被测螺栓温度；
- 螺栓材料；
- 螺栓规格；
- 螺栓端面表面粗糙度；
- 螺栓安装位置；
- 检测位置；
- 超声体波检测探头中心频率；
- 螺栓轴向应力数值等。

附录 A
(资料性)
远程监测系统

A.1 远程监测系统功能及构成

A.1.1 一般要求

用于本标准方法的远程监测系统，如图B.1所示，至少应包括现场检测系统、网络云服务系统和远程监视系统。



图B.1 螺栓服役应力超声体波监测系统

A.1.2 现场检测系统

现场检测系统可以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云服务系统中，为远程监视系统提供数据源。

A.1.3 网络云服务系统

网络云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，既可以将现场检测的螺栓轴向应力值保存到云端，也可以将云端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，将网络云服务系统中的螺栓轴向应力值实时下载到本地；然后对其进行数据处理，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 检测位置

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

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云服务体系。

b) 开启现场检测系统和远程监视系统的网络服务，使能两系统之间的数据传输，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）的螺栓给出报警提示。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] S H D, L K J. Second Order elastic deformation of solids[J]. Physics Review, 1953,5(92):1145-1149.
- [6] 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(01):32-37.
- [7] 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.
- [8] 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):337-342.
- [9] 徐春广, 李骁, 潘勤学. 螺栓拉应力超声无损检测方法[J]. 应用声学, 2014,33(2):102-106.
- [10] 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, 2017,42(2):195-204.
- [11] 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, 2019,40(4):880-888.
- [12] 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.
- [13] Sayed A. Nassar, Aditya B. Veeram. Ultrasonic Control of Fastener Tightening Using Varying Wave Speed[J]. Journal of Pressure Vessel Technology AUGUST 2006, Vol. 128:427-432
- [14] 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. 129:383-390
-