



中华人民共和国国家标准

GB/T 38952—2020

无损检测 残余应力超声体波检测方法

Non-destructive testing—Testing method for measuring residual stress using
bulk wave

2020-06-02 发布

2020-12-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 人员要求 1

5 检测要点 1

6 检测系统 3

7 纵波和横波声弹性系数标定 4

8 检测流程 5

9 检测仪器校准 6

10 检测报告的编写 6

附录 A（规范性附录） 拉伸试样的制备方法 7

附录 B（规范性附录） 部分常用残余应力消减方法的基本原理 9

附录 C（规范性附录） 检测仪校准方法 10

参考文献 12



前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56)提出并归口。

本标准起草单位:北京理工大学、上海材料研究所、中钢集团郑州金属制品研究院有限公司、四川航天长征装备制造有限公司、内蒙古第一机械集团有限公司、西安先进应力检测控制技术有限公司。

本标准主要起草人:徐春广、李志向、蒋建生、张钊、焦京俊、李全文、潘勤学、周世圆、丁杰、杜劭峰、郝娟、韩丽娜、肖定国、郑森木、王军强、宋剑峰、卢钰仁、尹鹏、栗双怡、苗兆伟。



无损检测 残余应力超声体波检测方法

1 范围

本标准规定了残余应力超声体波检测的术语和定义、人员要求、检测要点、检测系统、纵波和横波声弹性系数标定、检测流程、检测仪器校准和检测报告的编写要求。

本标准适用于采用超声体波进行材料残余应力的检测。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 7232 金属热处理工艺 术语
- GB/T 7704 无损检测 X射线应力测定方法
- GB/T 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证
- GB/T 12604.1 无损检测 术语 超声检测
- GB/T 16923 钢件的正火与退火
- 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 32073 无损检测 残余应力超声临界折射纵波检测方法

3 术语和定义

GB/T 7232、GB/T 12604.1界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

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。

3.2

体波探头 bulk wave probe

能够产生纵波和横波的探头。

4 人员要求

采用本标准进行检测的人员,应按照 GB/T 9445 或合同各方同意的体系进行资格鉴定与认证,并由雇主或代理对其进行岗位培训和操作授权。

5 检测要点

5.1 检测原理

依据声弹性在材料中与超声波传播方向一致的应力影响其传播速度,压缩应力加快超声波传播速

度、拉伸应力减慢超声波传播速度,用一个已知应力、且与被测构件材质与形状相同的构件为应力基准,通过检测构件材料内部超声波传播速度的变化可以得知构件内部应力的拉压状态和具体数值,应力拉压状态通常用“+”表示拉伸应力、“-”表示压缩应力。

由于许多现场工况中的板厚度尺寸和杆棒轴类构件的轴向尺寸、以及超声纵波或横波传播速度变化难以准确获得。因此,将残余应力纵波和横波检测方法结合起来,可以在未获知构件板厚或轴向尺寸的前提下,就可以获得超声纵波和横波传播方向上的应力状态和数值。

已知构件材料的零应力状态,则由声弹性原理可知,被检测材料中纵波和横波传播方向上的应力 σ 如式(1)^[1]所示:

$$\sigma = \frac{T_L^2 T_{S0}^2 - T_S^2 T_{L0}^2}{\epsilon_S T_S^2 T_{L0}^2 - \epsilon_L T_L^2 T_{S0}^2} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

σ ——纵波和横波传播方向上的应力,单位为兆帕(MPa);

T_{L0} ——零应力纵波的声时,单位为纳秒(ns);

T_{S0} ——零应力横波的声时,单位为纳秒(ns);

T_L ——有应力纵波的声时,单位为纳秒(ns);

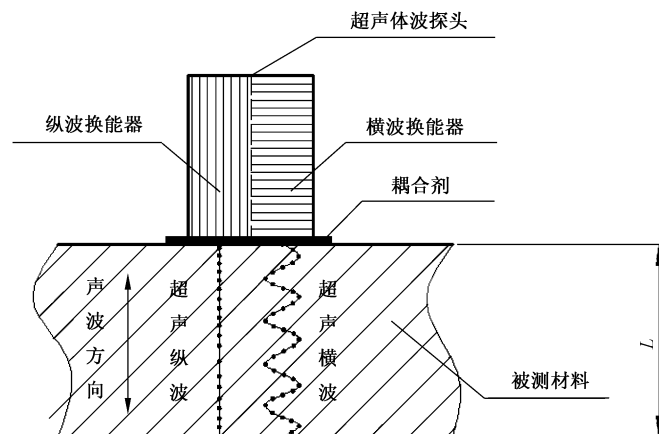
T_S ——有应力横波的声时,单位为纳秒(ns);

ϵ_L ——纵波声弹性系数,单位为每兆帕(MPa⁻¹);

ϵ_S ——横波声弹性系数,单位为每兆帕(MPa⁻¹)。

5.2 检测区域

本标准规定的方法所测到的应力是体波探头下面材料内部沿声波传播方向上应力的平均值,检测区域横向范围的大小取决于检测探头声激励和接收元件的横向截面尺寸,体波探头置于检测表面时,要求与被检测构件表面有效耦合,确保能独立地激发和接收超声纵波和超声横波,如图1所示。



说明:

L ——检测区域的纵向范围。

图1 残余应力超声体波(纵波和横波)检测原理示意图

检测区域纵向范围的大小(L),对于杆棒轴类构件对应其长度,对于板类构件对应其厚度(曲面构件对应其法向厚度)。检测区域纵向范围(L)的最大值取决于声衰减情况,即体波探头可以有效地接收到底面反射纵波和横波。

5.3 被检测构件

被检测构件材料应是透声良好的金属或非金属材料,构件表面粗糙度和形廓应不影响超声纵波和横波的有效耦合。

6 检测系统

6.1 基本要求

用于本标准规定的残余应力无损检测系统,至少应包括有超声体波探头或超声纵波和/或横波探头、残余应力超声体波检测仪、温度传感器、耦合剂与固定辅助工装。

6.2 超声体波探头

6.2.1 超声体波探头(或超声纵波和/或横波探头)应同时发射和接收超声纵波和横波;根据被检测构件材料声学特性、尺寸与形廓、检测区域及长度(L)等需求,选定超声体波探头的中心频率、发射面面积等参数,以确保在声波方向上获得超声纵波和横波。探头的声束特性按照 GB/T 18852 规定的方法测量。

6.2.2 检测构件用和标定用的超声体波探头(或超声纵波和/或横波探头)应保持一致,主要包括中心频率、发射面面积、温度特性等参数。

6.2.3 超声体波探头(或超声纵波和/或横波探头)接触面应与被检测构件表面良好贴合,必要时采用曲面楔块和固定辅助工装,探头的发射面面积通常应小于被检测构件截面积。

6.2.4 凡是能有效产生和传播超声纵波和横波的探头都可以构成体波探头(或超声纵波和/或横波探头),如压电超声、电磁超声、激光超声等方式。

6.2.5 超声体波探头(或独立的超声纵波和/或横波探头)中的纵波探头和横波探头可为一体式的,也可是分体独立式的。

6.3 残余应力超声体波检测仪

残余应力超声体波检测仪的作用是控制体波换能器激励和接收纵波和横波、计算超声体波传播时间和声波方向应力数值和状态;检测仪器可由脉冲收发仪、示波器等通用仪器构成,也可采用具有脉冲收发功能、波形数字化功能和计算机等软硬件部分构成。

6.4 温度传感器

通常温度传感器粘贴于体波检测探头附近,应在有效温度范围内准确获得被检测构件的真实温度,且测量精度满足 A 级以上(或测量精度满足 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$)(以铂电阻温度传感器为例)。

6.5 耦合剂

压电式超声体波探头应使用专用耦合液(如横波耦合剂),以保证在规定的工作温度范围内具有稳定可靠的声耦合。应力状态的检测和长期监测,应确保纵波和横波声弹性系数标定过程、基准零应力标定过程与构件实际检测过程的耦合状态基本一致。

6.6 固定辅助工装

压电式超声体波探头应使用固定辅助工装,应确保纵波和横波声弹性系数标定过程、基准零应力标定过程与构件实际检测过程的耦合状态基本一致。

7 纵波和横波声弹性系数标定

7.1 基本要求

分别由声弹性理论计算和拉伸试验方法获得纵波和横波声弹性系数 ϵ_L 、 ϵ_S ；基准零应力体波声时 T_{L0} 、 T_{S0} 通过对基准零应力试样进行标定。

7.2 声弹性系数的理论计算方法

纵波声弹性系数 ϵ_L 按式(2)计算：

$$\epsilon_L = \frac{(4\lambda + 10\mu + 4m)/\mu + (2l - 3\lambda - 10\mu - 4m)/(\lambda + 2\mu)}{3\lambda + 2\mu} \dots\dots\dots (2)$$

横波声弹性系数 ϵ_S 按式(3)计算：

$$\epsilon_S = \frac{\lambda n / 4\mu + 4\lambda + 4\mu + m}{\mu(3\lambda + 2\mu)} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

λ, μ ——二阶拉梅弹性常数；

l, m, n ——三阶默纳汉弹性常数。

7.3 声弹性系数的拉伸试验方法

7.3.1 拉伸试样

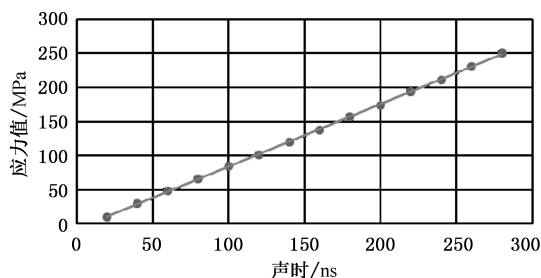
拉伸试样形廓尺寸应符合附录 A 中 A.2.2 的要求，材料晶格取向应与被测构件材料一致，应按附录 A 规定的方法制备。

7.3.2 拉伸试验

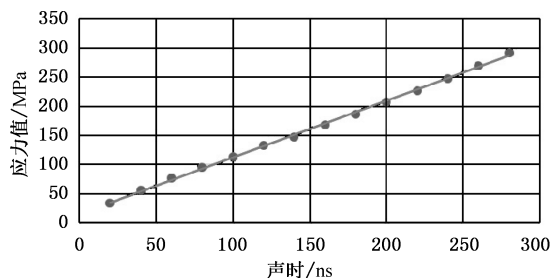
应按照 GB/T 228.1 规定的方法，在常温环境(10℃～35℃)下，在材料弹性范围内对试样进行拉伸试验。

拉伸试验前，首先应检测拉伸试样零应力状态下的纵波的声时 T_{L0} 和横波声时 T_{S0} 。

拉伸试验过程中，残余应力超声体波检测仪测量所得纵波的声时变化 Δt_L 、横波的声时变化 Δt_S 与拉伸试验机输出的标准拉应力变化 $\Delta\sigma$ 的关系分别如图 2 a)和图 2 b)所示，测量不少于 9 个点，重复拉伸次数不少于 5 次，取平均值，对数据分别进行线性拟合，得到的直线斜率即为纵波声应力系数 K_L 和横波声应力系数 K_S 。



a) 纵波声应力系数 K_L 线性拟合图



b) 横波声应力系数 K_S 线性拟合图

注：图中示例数据实验条件为：传感器中心频率为 2.25 MHz，被测构件为性能 A2-70 的螺栓，室温为 23℃。

图 2 拉伸应力值与声时(Δt)的线性关系

7.3.3 体波声弹性系数 ϵ_L 、 ϵ_S

纵波声弹性系数 ϵ_L 和横波声弹性系数 ϵ_S 分别由式(4)和式(5)计算得到:

$$\epsilon_L = \frac{-2}{K_L T_{L0}} \dots\dots\dots (4)$$

$$\epsilon_S = \frac{-2}{K_S T_{S0}} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

K_L ——纵波应力系数,单位为兆帕每纳秒(MPa/ns);

K_S ——横波应力系数,单位为兆帕每纳秒(MPa/ns);

T_{L0} ——零应力纵波的声时,单位为纳秒(ns);

T_{S0} ——零应力横波的声时,单位为纳秒(ns)。

7.4 零应力体波声时 T_{L0} 、 T_{S0} 的标定

基准零应力试样可以按 GB/T 16923 要求利用反复退火方法制备,或按 GB/T 25712 要求利用振动时效法、高能声束控制法等方法(见附录 B)消减残余应力,可以利用 GB/T 7704 或 GB/T 32073 所述方法对残余应力的消减过程进行跟踪检测和判定。通常要求基准零应力试样与被检测试样的材质、尺寸形廓和检测表面粗糙度相同或相近。

对上述基准零应力试样进行超声纵波和横波检测得到的声时即为零应力体波声时 T_{L0} 和 T_{S0} 。

8 检测流程

8.1 基本要求

残余应力超声体波检测的基本流程包括:检测前准备→检测位置确定→检测的实施及要求。

8.2 检测前准备

- 8.2.1 应获知被检测构件材料的纵波声弹性系数 ϵ_L 和横波声弹性系数 ϵ_S (见 7.2 或 7.3)。
- 8.2.2 应制备基准零应力试样,以获得基准零应力状态下的纵波声时 T_{L0} 和横波声时 T_{S0} (见 7.4)。
- 8.2.3 残余应力体波检测仪器和探头应在校准有效期内且工作正常,工装安装应稳定可靠。
- 8.2.4 检测探头形廓应满足检测构件表面粗糙度,即体波探头有效地接收到底面的反射纵波和横波。

8.3 检测位置确定

依据构件受力分析或用户提出或由合同双方商定。

8.4 检测的实施及要求

- 8.4.1 被检测构件表面应清洁无污,体波探头与被检测构件表面的耦合状态应与声弹性系数标定及纵波声时和横波声时测量时的耦合状态基本一致。
- 8.4.2 对基准零应力试块进行检测,在指定位置上放置超声体波探头,当耦合状态稳定时,体波检测仪器开始检测工作,获得 T_{L0} 和 T_{S0} 。温度传感器测量试块的温度。
- 8.4.3 对构件的应力进行检测,在指定位置上放置超声体波探头,当耦合状态稳定时,体波检测仪器开始检测工作,在确保有清晰体波回波的基础上,正确截取波段,计算声时 T_L 和 T_S ,得到体波传播方向上的应力数值和状态。正值表示拉应力,负值表示压应力(对零应力试块和构件检测的过程中,回波峰值应保证在体波检测仪满量程的 60% 到 80%)。检测构件时的环境温度应在检测零应力试块时温度

±15℃范围内,并对检测到的应力数值进行实时温度补偿和修正;如果超出该温度范围,应对零应力声时进行重新标定。

8.4.4 检测流程中应使用零应力试块进行标定,细化检测流程。

9 检测仪器校准

应定期对残余应力超声体波检测仪器进行综合性能校准,以确认其测量数值的准确性,校准间隔最长不超过一年。具体校准方法见附录 C。

10 检测报告的编写

10.1 检测记录

在残余应力检测过程中,可以手动或自动记录检测结果,检测结果应包括检测环境温度、工件材料、厚度、残余应力检测数值等。

10.2 检测报告

检测报告内容一般包括检测单位、人员、日期、检测环境温度、以及工件材料、厚度、粗糙度、检测区域大小、位置和方向、超声体波探头型号、厂家及中心频率、残余应力检测的具体数值等。



附 录 A
(规范性附录)
拉伸试样的制备方法

A.1 概述

本附录规定了残余应力超声体波检测中拉伸试样的制备方法。

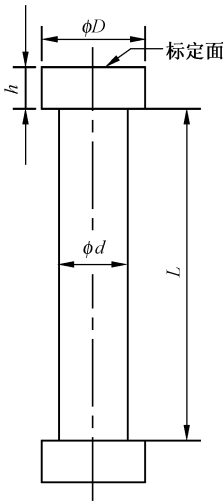
A.2 拉伸试样的制备

A.2.1 拉伸试样的材料

拉伸试样应采用与被测件材料、组织状态、表面粗糙度一致的材料。

A.2.2 拉伸试样的形状尺寸

拉伸试样的形状如图 A.1 所示,尺寸范围见表 A.1,允许误差 $\pm 0.1\text{ mm}$ 。标定面的表面粗糙度 Ra 应小于 $12\text{ }\mu\text{m}$ 。



说明：
 D ——拉伸试样上、下端的直径；
 d ——拉伸试样中间部分的直径；
 h ——拉伸试样上、下端的厚度；
 L ——拉伸试样中间部分的长度。

图 A.1 拉伸试样形状

表 A.1 拉伸试样的尺寸范围 单位为毫米

上下端厚度 h	中间部分长度 L	总长度	上下端直径 D	中间部分直径 d
≥ 5	≥ 10	≥ 20	≥ 12	≥ 8

A.2.3 拉伸试样的零应力处理

选择下述方法之一,对试样进行去应力处理:

- a) 按 GB/T 16923 所述方法,利用退火热处理对试样进行去应力处理,退火后试样的金相组织状态应与被检件的材料组织状态相同。
- b) 按 GB/T 25712 所述方法,利用振动时效对试样进行去应力处理。
- c) 按附录 B 的相关方法,对试样进行去应力处理。

附 录 B

(规范性附录)

部分常用残余应力消减方法的基本原理

B.1 概述

本附录给出了几种常用的机械构件残余应力消除方法的基本原理,提供在残余应力的消除和基准零应力试样制备过程中参考应用。如果在生产实际中有更好的消除方法,同样也可以采用。

B.2 常用产品残余应力消除方法的基本原理

B.2.1 残余应力消减的高能声束(Acoustic Beam)方法基本原理

基于高能超声对材料的塑性诱导效应,当作用于材料内的声束能量大于残余应力构成的势能时,激活材料错位晶格,使得晶格从畸变状态恢复到正常状态,从而起到消减残余应力目的。

B.2.2 残余应力消减的退火(Annealing)方法基本原理

利用热处理当中的退火技术,在热作用下通过原子扩散及塑性变形来促使内应力得到消减。

B.2.3 残余应力消减的振动(Vibration)方法基本原理

通过控制激振器的激振频率,使工件发生共振和交变运动并吸收部分能量,以致材料内部发生微观粘弹塑性力学变化,从而降低和均化工件局部残余应力集中分布状态。

B.2.4 残余应力消减的短冲击(Short Pining)法基本原理

超声冲击处理方法是一种以针式冲击头以较高频率撞击机械构件表面使其发生塑性变形来消减构件表面残余应力的方法,有细化晶粒的作用,同时对构件表面带来微损伤。

B.2.5 残余应力消减的自然时效法基本原理

残余应力自然时效消减方法通常是通过把零件暴露于自然环境下,经过几个月至几年的时间,使构件内部残余应力得到逐步释放的一种方法。

B.2.6 残余应力消减的人工锤击法基本原理

人工锤击法是利用金属锤直接敲击或冲击机械构件表面而消减构件材料残余应力的一种方法,消减效果取决于试件刚度、锤头材质和操作者熟练程度,该方法通常只能消减构件表面残余应力。

附 录 C

(规范性附录)

检测仪校准方法

C.1 概述

本附录规定了残余应力超声体波检测仪的校准方法,主要包括校准方法、校准流程和校准报告。
本附录规定的校准方法应由具有超声仪器校准资质的机构完成校准过程和出具校准报告。

C.2 校准方法

C.2.1 总则

采用力值可溯源方法校准。利用经校准的拉伸机,对检测仪进行校准。整个校准试验的最大加载应力值,应不低于材料屈服强度的 $2/3$ 且处于其弹性范围内。单次校准加载的载荷值应不少于 10 个,试验过程应至少重复 5 次以上,校准的温度应在 $18\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内。

C.2.2 校准流程

利用计算机控制拉伸机工作,对被测材料的拉伸试样(如 M36 螺栓)进行拉伸应力加载,将加载的应力值与超声体波检测系统检测的应力值对比。要求该超声体波检测系统,可以控制检测中的各项参数(包括激励电压,增益,滤波和零位偏移等),并能直接给出对应的检测应力值。在不同的加载拉伸应力情况下,如果偏差在 20 MPa 以下,则认为检测系统稳定可靠。否则,应拟合超声体波检测仪获得的声时-应力曲线,得到经过校准后的声弹性常数。然后,使用拉伸机重新完成拉伸应力加载过程,验证加载与检测应力的重复性,直至满足要求,校准结束,校准流程如图 C.1 所示。

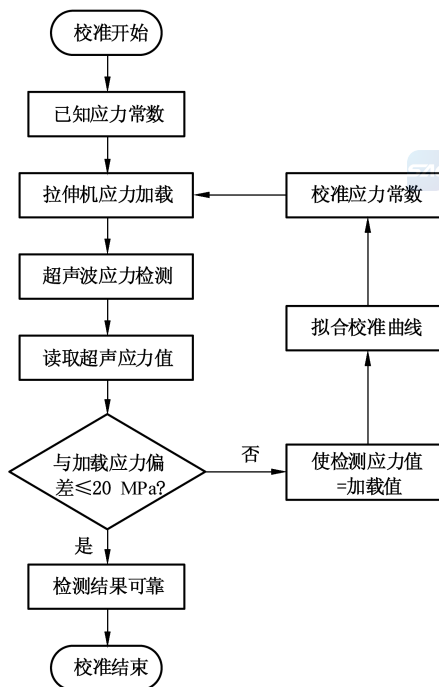


图 C.1 绝对校准流程图

C.3 校准报告

残余应力超声检测仪器性能综合校准报告,宜包含如下的信息:

- a) 注明采用本标准附录;
- b) 使用拉伸试验机的型号及参数;
- c) 使用拉伸试样的型号、材料、尺寸及性能指标;
- d) 被校准的仪器的型号和性能指标;
- e) 校准试验过程加载的载荷和对应的检测结果;
- f) 校准日期和校准机构的信息。



参 考 文 献

- [1] 徐春广,李焕新,王俊峰,等. 残余应力的超声横波检测方法[J]. 声学学报,2017(2):195-204.
-

