



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 43900—2024

## 钢产品无损检测 轴类构件扭转残余应力 分布状态超声检测方法

Non-destructive testing of steel products—Method for ultrasonic testing of  
torsional residual stress distribution of shaft

2024-04-25 发布

2024-11-01 实施

国家市场监督管理总局 发布  
国家标准化管理委员会



## 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。

本文件由中国钢铁工业协会提出。

本标准由全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183)归口。

本文件起草单位：北京理工大学、中国石油物资有限公司、德阳市产品质量监督检验所、中车永济电机有限公司、冶金工业信息标准研究院、内蒙古第一机械集团股份有限公司、中国兵器科学研究院宁波分院、北京北方车辆集团有限公司、山西柴油机工业有限责任公司、中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司、国家能源集团科学技术研究院有限公司、中车唐山机车车辆有限公司、济南二机床集团有限公司。

本文件主要起草人：徐春广、郭建光、宋文渊、谢东、刘海宁、董莉、李培禄、尹鹏、单志鹏、白龙、李喆、邓韬、张云龙、孙东、贺痴、张雅峰、孙明学、薛建忠、李宏伟、刘士渊、董德秀、李阳、许红江、李宗强、卢钰仁、郭建龙、张光祥、杨光粲、栗双怡。



# 钢产品无损检测 轴类构件扭转残余应力 分布状态超声检测方法

## 1 范围

本文件规定了轴类构件扭转残余应力分布状态超声检测的一般要求、检测设备、试样、检测方法、检测程序和检测报告。

本文件适用于钢制轴类构件扭转残余应力分布状态下频率范围为 0.1 MHz~20.0 MHz 的超声检测,外界载荷导致的轴类构件服役扭转应力的无损检测和监测可参照本文件使用,其他金属材料轴类构件亦可参照使用。

## 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 7232 金属热处理 术语

GB/T 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证

GB/T 10128 金属材料 室温扭转试验方法

GB/T 12604.1 无损检测 术语 超声检测

GB/T 27664.1 无损检测 超声检测设备的性能与检验 第 1 部分:仪器

GB/T 32073 无损检测 残余应力超声临界折射纵波检测方法

GB/T 38811 金属材料 残余应力 声束控制法

## 3 术语和定义

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

### 3.1

**扭转残余应力 torsional residual stress**

轴类构件表层一定深度范围内沿一定角度分布的应力。

注:常用检测角度为 0°、45°、90°。

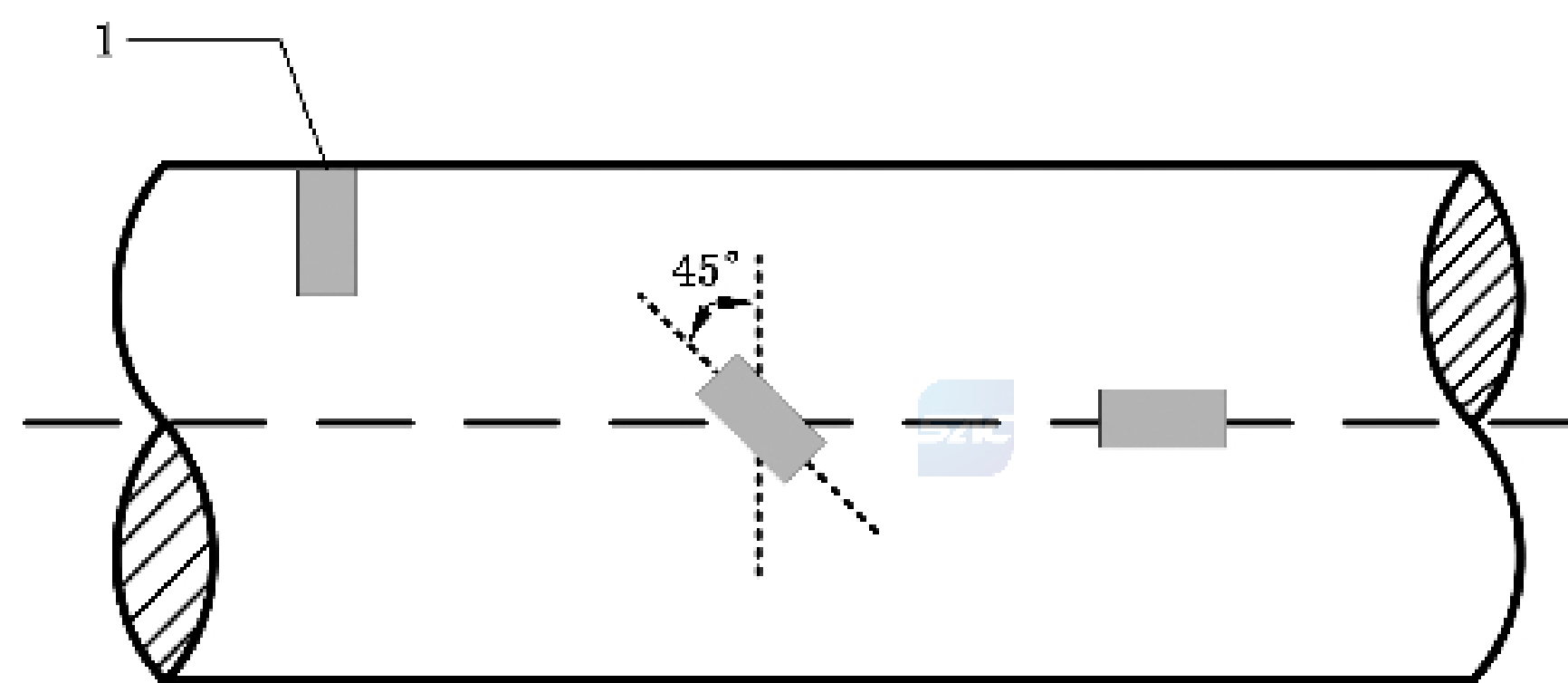
## 4 检测原理

依据 Snell 定律,检测探头为了在被检测轴类构件表层内部产生和接收超声临界折射纵波,其可在表面沿与轴心线任意角度的方向放置,一般如图 1 a)所示。依据声弹性原理,当轴类构件残余应力方向与纵波方向一致时,拉应力使超声波传播速度变慢或传播时间( $t$ )延长,压应力使超声波传播速度加快或传播时间( $t$ )缩短。已知零应力( $\sigma_0$ )的轴类构件内超声传播时间( $t_0$ ),可根据时间差求出被检测轴类构件中的残余应力( $\sigma$ ),计算方法见公式(1):

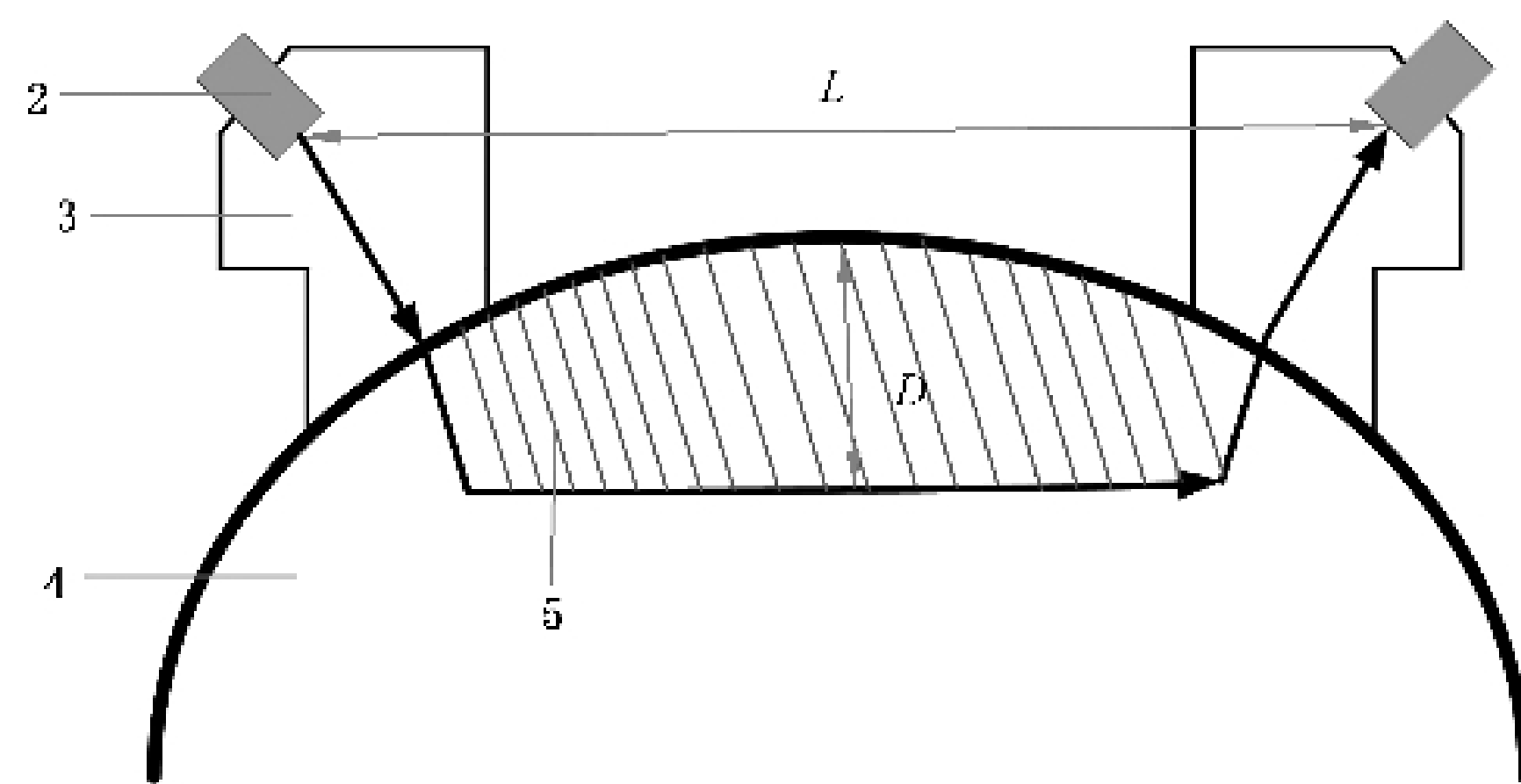
$$\sigma = \frac{2V_0}{ks}(t - t_0) = \frac{2V_0}{k\varphi r}(t - t_0) = \frac{2V_0(t - t_0)}{k\varphi(\frac{D}{2} - \alpha F^{-0.96})} = K(t - t_0) \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中：

- $\sigma$  ——残余应力,单位为兆帕(MPa);
- $V_0$  ——零应力条件下临界折射纵波的传播速度,单位为米每秒(m/s);
- $k$  ——轴类构件的声弹性系数,单位为平方米每牛( $\text{m}^2/\text{N}$ );
- $s$  ——临界折射纵波周向传播弧长,单位为米(m);
- $t$  —— $\sigma$  应力条件下临界折射纵波的传播时间,单位为秒(s);
- $t_0$  ——零应力条件下临界折射纵波的传播时间,单位为秒(s);
- $\varphi$  ——临界折射纵波周向传播弧长对应圆心角,单位为弧度(rad);
- $r$  ——临界折射纵波周向传播弧长曲率半径,单位为米(m);
- $D$  ——被测轴类构件的直径,单位为米(m);
- $\alpha$  ——渗透深度修正系数;
- $F$  ——超声换能器中心频率,单位为兆赫(MHz);
- $K$  ——应力系数,单位为兆帕每纳秒(MPa/ns)。



a) 探头布置示意图



b) 轴类构件周向残余应力和轴向残余应力超声检测示意图

标引序号说明：

- 1——检测探头；
- 2——超声换能器；
- 3——耦合声楔块；
- 4——被检测轴类构件；
- 5——残余应力检测区域；
- $D$ ——检测深度；
- $L$ ——声传播距离。

图 1 轴类构件残余应力检测示意图

## 5 一般要求

- 5.1 轴类构件扭转残余应力检测区域和方向由用户提出,或由合同双方商定。
- 5.2 按本文件实施检测的人员应通过本文件和 GB/T 9445 的专业培训。
- 5.3 被检轴类构件表面粗糙度应不大于  $12\ \mu\text{m}$ 。检测区域应不小于检测探头尺寸。
- 5.4 应使用适当的耦合剂,保证在工作温度范围内探头与被检测构件表面具有稳定可靠的超声耦合。应力系数标定、零应力标定和检测过程中应使用相同的耦合剂。
- 5.5 检测应在  $5\ ^\circ\text{C}\sim 45\ ^\circ\text{C}$  进行,当检测温度与零应力标定的温度差大于  $5\ ^\circ\text{C}$  时应进行温度补偿,温度补偿应符合 GB/T 32073 的规定。

## 6 检测设备

### 6.1 检测系统

轴类构件残余应力检测系统至少应包括检测仪、超声换能器、耦合声楔块、零应力试样、温度传感器、耦合剂,检测系统应满足 GB/T 32073 的相关要求。

### 6.2 探头

探头的选取应符合 GB/T 32073 的规定,超声收、发两个换能器的性能应一致,检测和标定应使用同一对换能器。

### 6.3 声楔块

声楔块接触面曲率应与被测轴类构件待测接触面一致,施加耦合剂后,应具有良好的耦合状态。声楔块应根据探头尺寸以及实际检测需要制作。

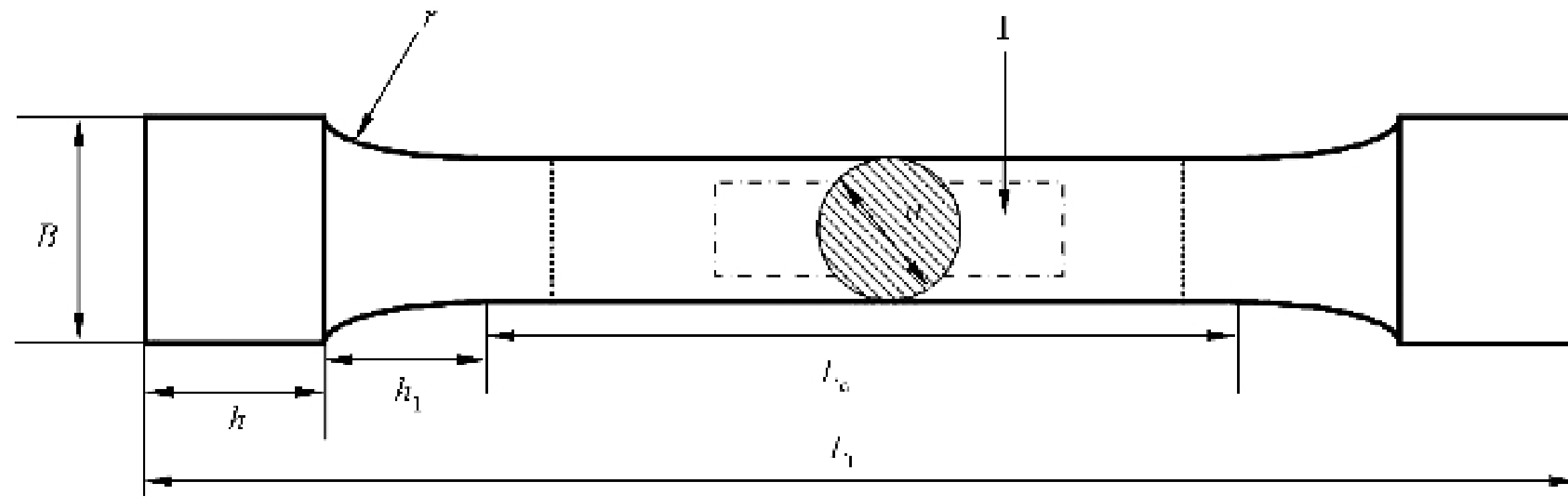
### 6.4 检测仪

轴类构件残余应力检测仪应定期进行校准,包括检测仪的超声收发功能、数据采集与时频域功能、温度补偿功能等的校准,其性能应符合 GB/T 27664.1 的规定。

## 7 试样

### 7.1 应力系数标定用试样

应力系数标定用试样的材料、直径( $a$ )、表面粗糙度应与被测轴类构件相同或相近,试样总长度( $L_1$ )一般为声楔块长度的 3 倍~4 倍。标定用试样的形状和尺寸如图 2 所示,尺寸应符合表 1 的要求。标定时,探头应按照图 1 所示的方向布置。



- 标引序号说明：
- 1 —— 标定区域；
  - a —— 试样直径；
  - B —— 试样端头直径；
  - h —— 试样端头宽度；
  - h<sub>1</sub> —— 过渡区长度；
  - L<sub>c</sub> —— 平行长度；
  - L<sub>t</sub> —— 试样总长度；
  - r —— 过渡半径。

图 2 标定试样的形状和尺寸

表 1 标定试样的尺寸范围

单位为毫米

a	r	L <sub>c</sub>	L <sub>t</sub>	B	h <sub>1</sub>	h
≥35	≥20	60~240	170~350	30~60	≥15	40~60

## 7.2 零应力试样

零应力标准试样一般为被测轴的一部分(长度大于检测声楔块长度的 2 倍~3 倍),试样应按照 GB/T 38811 的规定进行高能声束处理,消减其内部的残余应力,零应力试块内部残余应力小于试样材料屈服强度的 5%时,可视为试样内部残余应力为零。

## 8 检测方法

### 8.1 检测区域的确定

本文件规定方法所检测的轴类构件残余应力是表层下内部三维空间区域内残余应力的平均值,检测区域为超声波传播的区域,如图 1 b)所示。轴类构件残余应力方向应与临界折射纵波传播方向一致,负值残余应力表示压应力,正值表示拉应力。

### 8.2 超声换能器中心频率的选择

8.2.1 超声换能器中心频率与检测深度一般由合同双方商定,频率的选取可参照表 2。

8.2.2 钢材轴类构件的检测深度与超声换能器中心频率应按公式(2)计算:

$$D = \alpha_s \times f^{-1.07} \dots\dots\dots(2)$$



式中：

$D$  ——检测深度,单位为毫米(mm)；

$\alpha_s$  ——渗透深度修正系数；

$f$  ——超声换能器中心频率,单位为兆赫(MHz)。

表 2 钢材轴类构件残余应力超声换能器中心频率和检测深度对照表

超声换能器中心频率/MHz	20.0	15.0	10.0	7.5	5.0	2.5	1.0	0.5	0.2	0.1
检测深度/mm	0.24	0.32	0.50	0.70	1.10	2.20	5.90	12.40	33.00	69.30

### 8.3 应力系数的标定

应按 GB/T 10128 规定的方法对试块进行扭转试验以获取应力系数。在材料弹性范围内,记录检测仪的声时差和扭转试验设备输出的扭转应力变化。测量点应不少于 10 点,重复扭转次数应不少于 5 次,取平均值。以扭转应力为横坐标,声时差为纵坐标对数据进行线性拟合绘图,得到直线斜率的倒数即为应力系数。若无条件进行扭转,也可按 GB/T 228.1 和 GB/T 32073 进行拉伸试验获取应力系数。

## 9 检测程序

9.1 检测前应确认轴类构件扭转残余应力检测仪工作正常且在有效使用期限范围内,按照 7.1、7.2 制作应力系数标定用试样和零应力试样,并按照 8.3 要求标定出应力系数。

9.2 使用检测系统对零应力试样进行零应力声时测量,获取零应力声时( $t_0$ )。检测时,探头及其布置方向、耦合剂与测量被测轴时一致。

9.3 探头表面与被检测构件表面应稳固紧密耦合,耦合接触力大小应与零应力声时测量时一致,检测得到被测应力( $\sigma$ )对应的临界折射纵波传播声时( $t$ )。

9.4 根据标定得到的应力系数( $K$ )、测量得到的零应力声时( $t_0$ )和被测应力声时( $t$ ),按照公式(1)计算得到被测应力( $\sigma$ )。

9.5 若残余应力数据出现大于轴类构件材料屈服强度的情况,应再次进行检测;如果仍然出现检测数值偏大现象,则应对检测区域进行缺陷的无损检测。

## 10 检测报告

检测报告应至少包括以下内容：

- a) 本文件编号；
- b) 检测环境温度；
- c) 检测轴类构件材质、直径、粗糙度等信息；
- d) 检测位置、区域大小和角度；
- e) 检测仪器信息、探头标称频率；
- f) 检测残余应力数值；
- g) 检测单位、人员、日期。



