

ICS 47.020.05

CCS U 06

T/CANSI

中国船舶工业行业协会团体标准

T/CANSI 157—2025

船舶焊接残余应力电磁超声检测方法

Electromagnetic ultrasonic testing method for residual stress in ship welding



2025-12-22 发布

2026-01-01 实施

中国船舶工业行业协会 发布

目 次

前言	II
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	2
5 检测原理	2
5.1 焊接残余应力电磁超声检测原理	2
5.2 焊接残余应力梯度的检测原理	4
6 仪器和设备	5
6.1 系统基本要求	6
6.2 电磁超声收发仪	6
6.3 残余应力分析仪	6
6.4 电磁超声换能器	6
6.5 换能器固定辅助工装	6
6.6 温度传感器	7
6.7 基准零应力试块	7
7 检测流程	7
7.1 概述	7
7.2 检测前准备	7
7.3 检测实施	7
8 检测结果与评估	8
9 检测报告	8
10 安全防护	9
附录 A (规范性) 应力系数标定方法	10
附录 B (资料性) 深度系数测定方法	11
附录 C (资料性) 基准零应力试块的高能声束制备方法	12
附录 D (规范性) 典型钢结构焊接区域应力检测部位示意图	17

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。

本文件由中国船舶工业行业协会标准化分会提出。

本文件由中国船舶工业行业协会归口。

本文件起草单位：北京理工大学、创极低应力（上海）科技有限公司、中国兵器科学研究院宁波分院、中国舰船研究设计中心、江苏科技大学、中国船舶集团有限公司第七一九研究所、武昌船舶重工集团有限公司、中国兵器工业集团第二〇一研究所、中远海运重工中兴海陆工程有限公司、中广核工程有限公司、株洲天一控股有限公司、长沙天一智能科技股份有限公司、内蒙古第一机械集团股份有限公司、内蒙古科技大学、内蒙古工业大学、江苏大学。

本文件主要起草人：徐春广、陈常宏、胡赛颐、蒋小伟、尹鹏、李培禄、叶水生、和卫平、唐敏、邓小兵、彭煜、陈怀江、潘永利、唐创基、李予卫、朱从斌、邹国伟、王少峰、蔡向荣、黄立新、郭定明、武建新、王琳、郭灿志、肖定国、李文凯、张文君、赵文政、马永江、靳聪、杨光粲、杨双旭、常金鹏、王文慧、虞班海、朱时洋、李洋、张建、周元凯、王锦涛、贺彦超、廖林、张相威、张海东、闫小顺。



船舶焊接残余应力电磁超声检测方法

1 范围

本文件规定了船舶焊接残余应力电磁超声检测方法的人员要求、检测原理、仪器和设备、检测流程、检测结果与评估、检测报告、安全防护等。

本文件适用于基于声弹性原理的具有电磁效应的材料构件内部残余应力和服役应力的电磁超声无损检测。

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 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 19001 质量管理体系 要求
- 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 34885 无损检测 电磁超声检测 总则
- GB/T 38811 金属材料 残余应力 声束控制法
- GB/T 38952 无损检测 残余应力超声体波检测方法
- GB/T 40121 技术产品文件 产品残余应力符号表示方法
- 中国船级社 《材料与焊接规范》 2024

3 术语和定义

GB/T 12604.1、GB/T 40121和GB/T 34885确立的以及下列术语和定义适用于本文件。

3. 1

切向残余应力 **tangential residual stress**

平行于构件表面的残余应力。

注：包括平面和曲面。

3. 2

初始残余应力 **initial residual stress**

原材料（金属板材、棒材或锭材等母材）由冶炼的液态金属在一定的体积下冷却凝固或轧制成型，制备过程中的不均匀温度场在其内部产生的残余应力。

3.3

焊接残余应力 **welding residual stress**

由于构件焊接工艺过程导致的、留存于焊缝附近区域的内部应力。

3.4

焊接热影响区 **heat affected zone**

在焊接热循环作用下，焊缝两侧处于固态的母材发生明显的内部微观组织组织变化和材料性能下降的区域。

3.5

服役应力 **in-service stress**

服役构件某部位承受所有应力的总和。

注：包括构件母材自身初始残余应力、焊接工艺过程引起的焊接残余应力、机械加工和热处理加工产生的加工残余应力、装配过程产生的装配应力、环境温度变化导致的热应力、外界载荷产生的载荷应力、钢结构自重引起的应力等。

3.6

残余应力阈值 **residual stress threshold**

构件安全服役残余应力的最大允许值。

3.7

电磁超声表面波 **electromagnetic ultrasonic surface wave**

利用电磁感应原理在构件表层产生的沿着构件表面传播的超声波。

4 人员要求

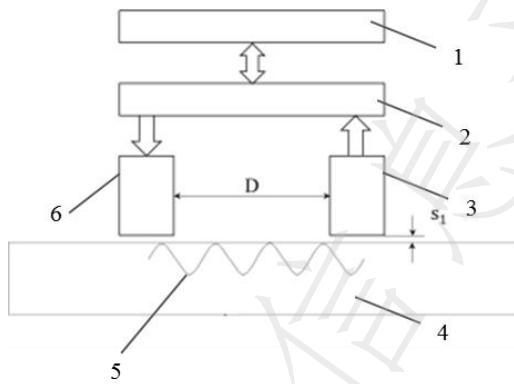
采用本文件进行检测的人员，应按照GB/T 9445或合同各方同意的体系进行资格鉴定与认证，并由雇主或代理对其进行岗位培训和操作授权。

5 检测原理

5.1 焊接残余应力电磁超声检测原理

依据声弹性原理，材料中的残余应力对超声波传播速度有影响，当应力方向与超声波传播方向一致时，拉伸应力会减慢超声波传播速度，压缩应力会加快超声波传播速度，由此可以利用声速变化检测被测构件内残余应力值。

切向残余应力电磁超声检测的基本原理是在被测构件表面上有一定距离 s_1 位置, 见图1, 放置电磁超声信号发射换能器和接收换能器, 两换能器之间距离为 D , 电磁超声换能器在被测构件上方通以瞬态交变电信号, 在被测构件表层产生感应涡流, 涡流区域材料质点在偏置磁场中受洛伦兹力或磁致伸缩力作用产生振动, 在被测构件内部产生表面波。将电磁超声与表面波检测结合起来, 可以非接触获得船舶大尺寸构件两换能器之间表层内部的残余应力状态和数值。

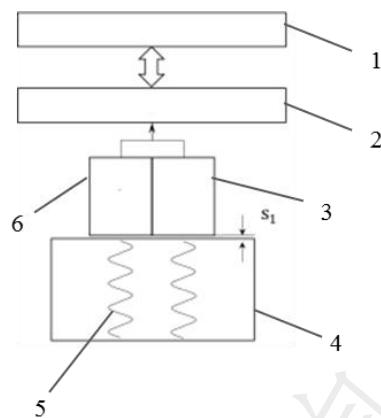


标引序号和符号说明:

- 1——残余应力分析仪;
- 2——电磁超声收发仪;
- 3——接收换能器;
- 4——被测构件器;
- 5——电磁超声表面波;
- 6——发射换能;
- D ——收发换能器间距;
- s_1 ——提离距离, 由材料性质和信号幅值决定。

图1 切向残余应力电磁超声表面波检测原理示意图

法向残余应力电磁超声检测同理, 见图2, 电磁超声换能器在被测构件上方内部产生体波, 体波传播方向沿被测构件表面法向, 由此可以非接触获得船舶大尺寸构件从体波入射到接收全程的残余应力状态和数值。



标引序号和符号说明：

- 1——残余应力分析仪;
- 2——电磁超声收发仪;
- 3——接收换能器;
- 4——被测构件;
- 5——电磁超声体波;
- 6——发射换能器;
- s_1 ——提离距离, 由材料性质和信号幅值决定。

图2 法向残余应力电磁超声体波检测原理示意图

已知被测构件的零应力状态,若测得零应力 σ_0 状态下对应的传播时间 t_0 和被测构件应力 σ 状态下对应的超声传播时间 t ,则由声弹性原理可知,被测构件中表面波传播方向上的应力见公式(1)或(2)。

或：

式中：

$\Delta\sigma$ ——残余应力的变化量(应力差) $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0$, 单位为兆帕(MPa);

Δt ——传播时间的变化量(声时差) $\Delta t = t - t_0$, 单位为微秒 (μs);

K ——表面波应力系数, 单位为兆帕每微秒 (MPa/ μ s), 与被测构件的材料、耦合状态和换能器间距有关, 可通过拉伸试验标定获得, 试验方法见附录A;

σ_0 ——被测构件零应力状态的应力值, 单位为兆帕 (MPa);

t_0 ——被测构件零应力状态对应的超声传播时间, 单位为微秒

σ ——被测构件有应力状态的应力值, 单位为兆帕 (MPa);

t ——被测构件有应力状态对应的超声传播时间, 单位为微秒 (μs)。

5.2 焊接残余应力梯度的检测原理

针对被测构件不同深度的残余应力进行测量,表面波在材料中的渗透深度与频率有关,改变频率改变波长从而获得准确的检测深度,实现不同厚度层的平均应力值检测,通过数据处理得到深度 z 处薄层内的应力,进而计算出应力梯度。表面波渗透深度与中心频率的关系见公式(3)。

$$D = \alpha_c \times f^{-0.96} \dots \quad (3)$$

式中：

D ——渗透深度, 单位为毫米 (mm);

f ——检测频率, 单位为兆赫兹 (MHz);

α_s ——深度系数, 单位为毫米每微秒 (mm/ μ s), 常用金属材料参考值: 钢 5.98, 铝 6.40, 铜 4.81, 可通过试验验证确定表面波的检测深度系数, 试验方法见附录 B。

依据上述切向残余应力深度检测原理,可以得到简化模型,将检测的区域认为是长方体区域,检测方法得到的内部应力为三维体积内的宏观体应力。因此,超声换能器的频率 f_1, f_2, \dots, f_n ($f_1 > f_2 > \dots > f_n$),对应的检测深度分别为 D_1, D_2, \dots, D_n ($D_1 < D_2 < \dots < D_n$),见图2,深度 z 处薄层(厚度 $D_{j-i} = D_j - D_i$)

处的应力值 $\sigma(z)$ 计算见公式 (4)。

$$\sigma(z)_{\text{meas}} = \sigma_j - \sigma_i \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

式中：

$\sigma(z)$ ——深度 z 处薄层 (厚度 $D_{j-i} = D_j - D_i$) 处的应力值, 单位为兆帕 (MPa);

σ_i ——深度 D_i 处的测量值, 单位为兆帕 (MPa);

σ_i ——深度 D_i 处的测量值, 单位为兆帕 (MPa);

进而可以计算出应力梯度, 见公式 (5)。

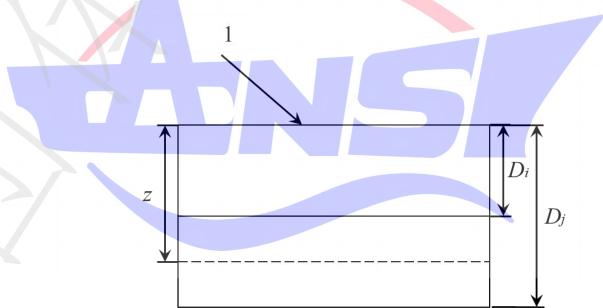
$$\nabla \sigma(z)_{\text{测}} = \frac{\sigma(z)_{\text{测}}}{D_j - D_i} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

式中：

$\nabla\sigma(z)$ ——深度 z 处薄层(厚度 $D_{j-i} = D_j - D_i$) 处的应力梯度, 单位为: 兆帕每毫米 (MPa/mm);

D_j ——检测深度为 j 时的检测区域, 单位为毫米 (mm);

D_i ——检测深度为 i 时的检测区域, 单位为毫米 (mm)。



标引序号和符号说明:

1——被测构件表面；

Z——检测深度；

D_i ——检测深度为i时的检测区域；

D_j ——检测深度为j时的检测区域。

图3 测量深度示意图

6 仪器和设备

6.1 系统基本要求

用于本文件规定检测方法的焊接残余应力电磁超声检测系统,至少应包括电磁超声收发仪、残余应力分析仪、专门制作的电磁超声换能器、换能器固定辅助工装、温度传感器和基准零应力试块。

6.2 电磁超声收发仪

6.2.1 电磁超声收发仪宜包含发射器、双工器、阻抗匹配器、放大器、信号采集器等模块。

6.2.2 电磁超声收发仪受残余应力分析仪的控制产生一定频率的电磁超声激励信号,同时,采集来自电磁超声换能器的超声信号。

6.3 残余应力分析仪

6.3.1 残余应力分析仪一般由脉冲收发仪、示波器和工控机等通用仪器构成或具有脉冲收发功能、波形数字化功能和计算机等软硬件系统构成。

6.3.2 残余应力分析仪可控制电磁超声收发仪发射和接收超声表面波、计算超声表面波传播时间和声波方向应力数值和状态;记录检测部位表面温度,根据检测部位表面温度设置温度补偿。

6.4 电磁超声换能器

6.4.1 电磁超声换能器主要由磁铁、线圈、线圈保护层、信号接口和外壳封装而成。

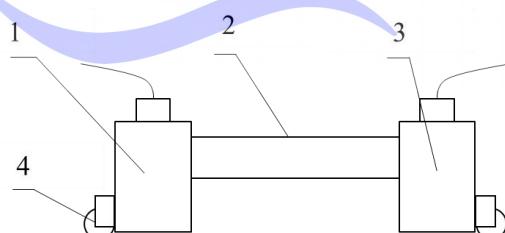
6.4.2 电磁超声换能器应具有发射和接收超声表面波的功能,根据被测构件材料声学性能、尺寸形廓、检测区域及长度等需求,选定电磁超声换能器的中心频率、发射和接收面的面积等参数,以确保在被测构件表面获得超声表面波。

6.4.3 检测构件用和标定用的电磁超声换能器应保持一致。

6.4.4 电磁超声换能器接触面应与被测构件表面良好耦合(可偏离一定距离、无需耦合剂)以产生超声表面波,换能器的发射和接收面的面积应小于被测构件检测面面积。

6.5 换能器固定辅助工装

电磁超声换能器应使用固定辅助工装,确保电磁超声表面波的应力系数标定过程、基准零应力标定过程与被测构件实际检测过程中换能器的距离、耦合偏离状态和相对运动速度一致,以实现快速扫查,见图4。



标引序号说明:

- 1——发射换能器;
- 2——收发换能器间距保持架;
- 3——接收换能器;
- 4——偏离距离保持架;

图4 电磁超声换能器固定辅助工装示意图

6.6 温度传感器

温度传感器应能在检测温度范围内准确测量被检测工件的温度,且测量精度应满足A级以上(以铂电阻温度传感器为例)。

6.7 基准零应力试块

6.7.1 基准零应力试块是指与被测构件材料材质和表面状态一致的、残余应力小于1%材料屈服强度的、满足本文件规定换能器形状和尺寸范围的试块,用于检测焊接残余应力前标定零应力状态下表面波传播速度。

6.7.2 基准零应力试块应采用高能声束方法制备,现场无法获得基准零应力试块时,也可将同材质构件的局部区域制备成零应力区域。制备方法可参考GB/T 38811,也可参考附录C。

7 检测流程

7.1 概述

焊接残余应力电磁超声检测过程包括检测前的准备和检测实施。

7.2 检测前准备

7.2.1 检测部位的选取

检测部位或区域应为焊接残余应力区域范围内,典型钢结构焊接区域应力检测部位见附录D。

7.2.2 检测表面状态

检测区域表面不应有影响检测结果有效性的锈蚀、飞溅、污物和不规则状态等。

7.2.3 待检测区域无损检测

待检测焊接区域应经过无损检测检验并合格。无损检测方法及合格级别应依据船舶制造企业现行的无损检测工艺规范在检测作业过程中确定,或达到中国船级社《材料与焊接规范》检测等级A级。

7.2.4 应力系数标定

按附录A的方法进行应力系数标定。

7.2.5 检测换能器选取

应根据被测构件检测区域的厚度选择相应频率的换能器,检测材料不同深度的残余应力时,根据需求选取相应的应力梯度检测换能器组合,检测换能器中心频率/波长通常要小于被测构件厚度,计算方法见公式(3)。

7.3 检测实施

7.3.1 零应力标定

检测开始时应首先标定零应力,将换能器稳定置于与被测构件曲率一致的基准零应力试块或同材质构件零应力区域上标定,获取基准零应力状态对应的表面波传播速度 V_0 或表面波传播时间 t_0 ,并记录。

7.3.2 检测

检测过程中应使电磁超声换能器与被测构件表面稳定贴合,无需耦合剂,可以保持小于0.5 mm的提离距离,耦合接触力应保持恒定且与标定过程一致,也可采用手工、磁吸、真空吸盘或弹簧等方法产生压紧力。

换能器放置方向应与检测应力方向一致,也可在垂直方向上分别检测出残余应力,然后矢量求和得出主应力及其方向;对于有曲率的焊缝,检测焊接残余应力时宜选择垂直焊缝方向,同时应兼顾构件曲率带来的换能器耦合损失。

7.3.3 温度补偿

残余应力检测过程中,应实时获取检测构件温度,并应对温度变化带来的残余应力检测误差进行补偿。

7.3.4 记录数据

读取残余应力数值应在接收电磁超声表面波稳定状态下进行,应记录检测时仪器参数和对应的残余应力数值。

8 检测结果与评估

8.1 在检测区域检测到的数值小于焊接残余应力阈值(0.3倍屈服强度)时,焊接热影响区或检测区域是安全的;数值越小,表明该区域的残余应力安全裕度越大。

8.2 当检测服役状态构件时,可根据残余应力阈值直接对构件的服役应力进行检测、监测和评判。

9 检测报告

9.1 残余应力超声检测应出具检测报告,在残余应力检测过程中,可以手动或自动记录检测结果,生成检测报告。

9.2 检测报告内容应包括:

- a) 委托单位;
- b) 被检对象特征;
- c) 项目名称、编号;
- d) 材质、规格、焊缝类型、焊接方式和热处理状态;
- e) 表面状态、检测温度、检测地点;
- f) 检测仪器型号和编号;
- g) 换能器类型、标称频率、线圈尺寸、实际折射角度和编号;
- h) 基准零应力试块型号和编号;
- i) 检测技术工艺规范;
- j) 检测部位、检测区域以及残余应力数值,可附检测示意图;
- k) 检测单位、检测人员和检测日期。

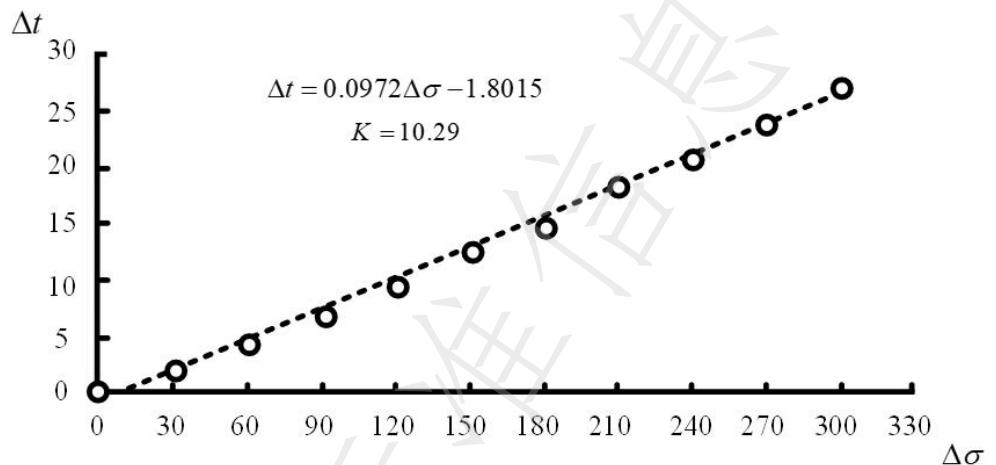
10 安全防护

- 10.1 检测人员应规范着装，穿戴防护用品。
- 10.2 使用仪器前应对仪器连接线、插头等设备及工具进行检查，合格后方可使用。
- 10.3 高空作业时应设有安全防护措施，防止人和仪器从高空坠落。

附录 A
(规范性)
应力系数标定方法

在常温环境下,应按照GB/T 228.1规定的方法,在材料弹性范围内对被测构件试样进行拉伸试验。拉伸试验前,应检测试样零应力状态下的表面波声速。

拉伸试验过程中,残余应力超声检测仪测量所得的声时差 Δt 与拉伸试验机输出的标准应力差 $\Delta\sigma$ 的关系见图A.1所示,测量应不少于10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,得到的直线斜率的倒数即为表面波应力系数 K 。



符号说明:

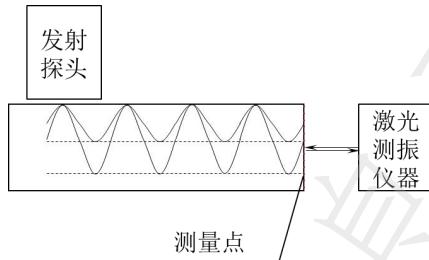
Δt ——声时差, 单位为纳秒 (ns);

$\Delta\sigma$ ——拉伸应力值, 单位为兆帕 (MPa)。

图A.1 声时差与应力差的线性关系

附录 B
(资料性)
深度系数测定方法

使用高精度激光测振仪器测量表面波传播构件截面并确定表面波的有效传播深度。



图B.1 深度系数激光测振方法示意图

首先，选择需要测量的材料试块，确保试块截面光滑且具有良好的反射性，以便激光可以有效照射及接收。接下来，在试块截面深度方向标定多个连续测量点，以便在后续步骤中准确记录振动数据。然后，安装激光测振仪器，确保激光器稳定固定，并通过光学元件调整激光束，使其精确聚焦于试块截面多个连续测量点。

使用超声检测仪器产生表面波。激活激光测振系统后，将激光束依次对准试块截面多个连续测量点，在不同测量点下逐点测量振动信号。改变不同频率重复此测试过程。记录的数据应包括振动幅度和频率信息，并形成不同频率的位移序列振动数据。

数据采集完成后，使用信号处理软件分析振动数据，绘制振动幅度与深度和频率的关系图，观察超声波在不同深度的衰减特性。对数据进行线性拟合，从而计算出深度系数 α_s 。

附录 C
(资料性)
基准零应力试块的高能声束制备方法

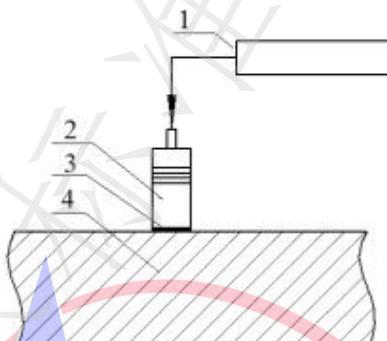
C. 1 制备原理

利用高能声速弹塑性诱导效应实现对材料内部残余应力的消减和均化, 即当高能声束提供给材料内部的能量大于残余应力场具有的势能时, 残余应力势能得以释放, 残余应力分布状态得以改变, 在不降低材料屈服强度和构件强度前提下, 实现材料内部残余应力的削减和均化。

C. 2 制备器材

C. 2. 1 制备器材构成原理

高能声束调控装置包括大功率信号控制与驱动器、高能声束激励器、耦合剂, 以及夹持装置和激励电压传输线缆等外围设备, 系统构成示意见图C. 1。



标引序号说明:

- 1——大功率信号控制与驱动器;
- 2——高能声束激励器;
- 3——耦合剂;
- 4——基准零应力试块。

图C. 1 基准零应力试块高能声束制备方法示意图

C. 2. 2 高能声束激励器

高能声束激励器宜按夹心式压电换能器或磁致伸缩换能器等原理制备, 工作频率宜为10 kHz~40 kHz, 单个激励器能量宜大于50 W, 取决于试块材料和尺寸因素。

C. 2. 3 耦合剂

在激励器表面与被制备试块表面之间使用高温黄油、蓝油等耐高温润滑脂, 电磁超声、激光超声等非耦合激励超声除外。高能声束经过耦合剂耦合进入被调控基准零应力试块而不对试块材料有任何表面损伤和内部材料结构损伤。

C. 2.4 夹持固定装置

夹持固定装置应保证激励器的端部与被调控表面稳定耦合，并使用方便、易于装夹。

C. 3 基准零应力试块

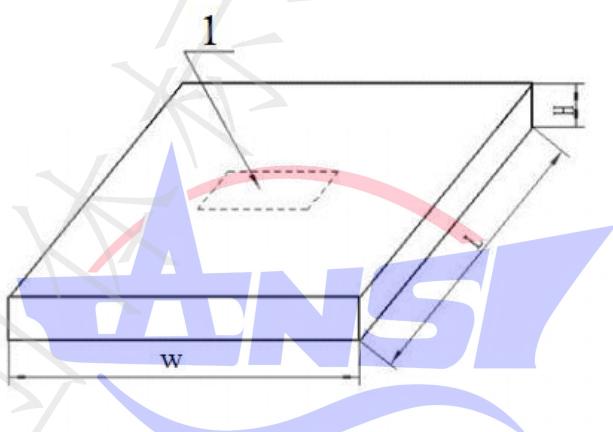
C. 3.1 材料选取

基准零应力试块应选取与被测构件相同的材料，声学特性应与被测构件相同，标定区域检测可采用超声、射线、磁粉或渗透等无损检测方法。

C. 3.2 尺寸要求

基准零应力试块尺寸示意如图C. 2所示，试块尺寸为长 (L) × 宽 (W) × 厚度 (H) (L=100 mm~200 mm, W=100 mm~200 mm, H=3.0 mm~30.0 mm)。试块长 (L) 和宽 (W) 应根据换能器尺寸确定，宜为换能器的长度的3倍以上，试块的厚度 (H) 应根据检测频率或波长确定，宜为波长的3倍以上或与被测构件厚度一致，例如，对于纵波声速为4700 m/s的普通碳钢，当检测频率为1.0 MHz~10.0 MHz时，试块厚度宜为3.0 mm~30.0 mm。

试块表面不应有划痕、凹坑、毛刺等缺陷。零应力试块或调控的构件表面的曲率应与被测构件曲率一致。



标引说明：

1——被调控区域和标定区域；

L——试块长度；

W——试块宽度；

H——试块厚度。

图C. 2 基准零应力试块结构尺寸示意图

C. 4 制备与保存

C. 4.1 初始残余应力检测

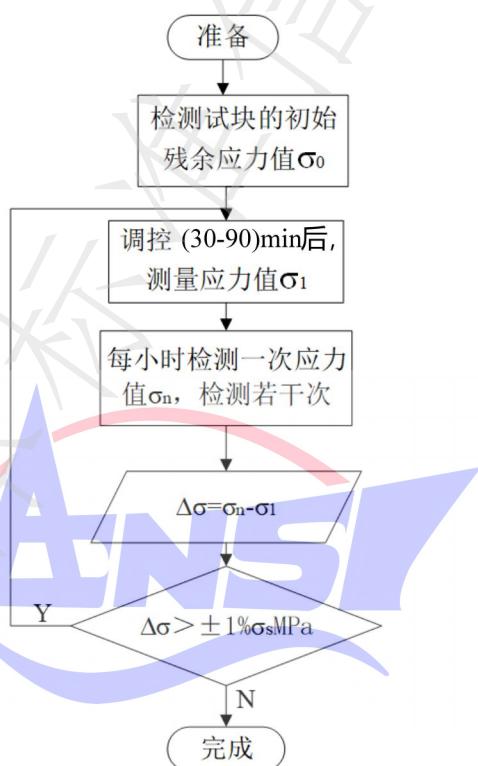
按照图C.3中的流程图, 调控前应先对调控区域或标定区域的初始残余应力进行检测, 可参考GB/T 32073采用超声临界折射纵波法或参考GB/T 38952采用超声体波法。

C. 4. 2 装夹

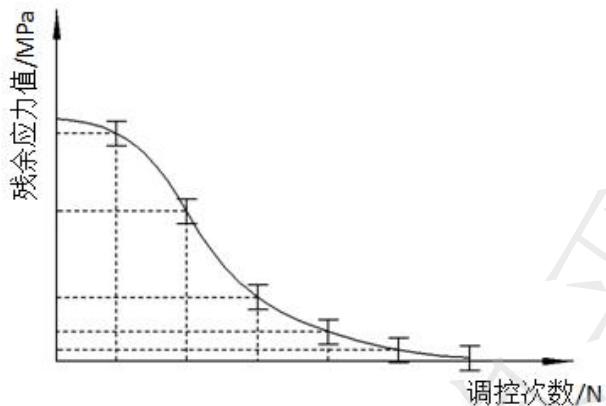
在标定区域(图C.2所示区域), 将耦合剂涂抹均匀, 并采用磁吸、真空吸附和机械装夹方式使激励器与被制备材料稳定压紧耦合。

C. 4. 3 制备过程

调控过程参照图C.3的方式, 实时监测残余应力变化情况, 也可在调控一段时间后检测基准零应力试块内残余应力。制备过程是一个反复调控、检测的过程, 试块的每一次调控, 残余应力下降一部分, 最后趋于平稳状态(见图C.4)。经过多次重复后, 试块中驻留的残余应力保持在 ± 20 MPa内或符合合同约定, 则认为试块的内部残余应力达到零应力状态。



图C.3 基准零应力试块制备流程图



图C.4 基准零应力试块制备过程中的残余应力下降曲线图

C.4.4 保存

基准零应力试块制备完成后, 检测残余应力值后, 将试块保存在 $22\text{ }^{\circ}\text{C}\pm2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒定温度环境下, 保证残余应力稳定不变。

使用试块时检测位置应固定在某个区域(图B.2中区域), 准确测量内部保持的定值, 每次完残余应力超声检测系统校准后, 及时将试块放回到恒温箱中。

在试块保存过程中, 宜避免发生冲击和振动而产生新的残余应力, 同时应定期监测并记录试样残余应力的变化。

C.5 检验

C.5.1 材质要求

与被测构件材质一致。

C.5.2 表面状态

表面不应有影响检测结果有效性的锈蚀、飞溅、污物和不规则状态等。

C.5.3 残余应力无损检测

残余应力无损检测参照GB/T 32073执行。

C.5.4 出厂检验

应力试块的制造商应对每批应力试块产品进行出厂检验, 并出具执行本文件所述方法的检验证书。出厂检验质量保证体系应符合GB/T 19001的规定。

C.6 标记

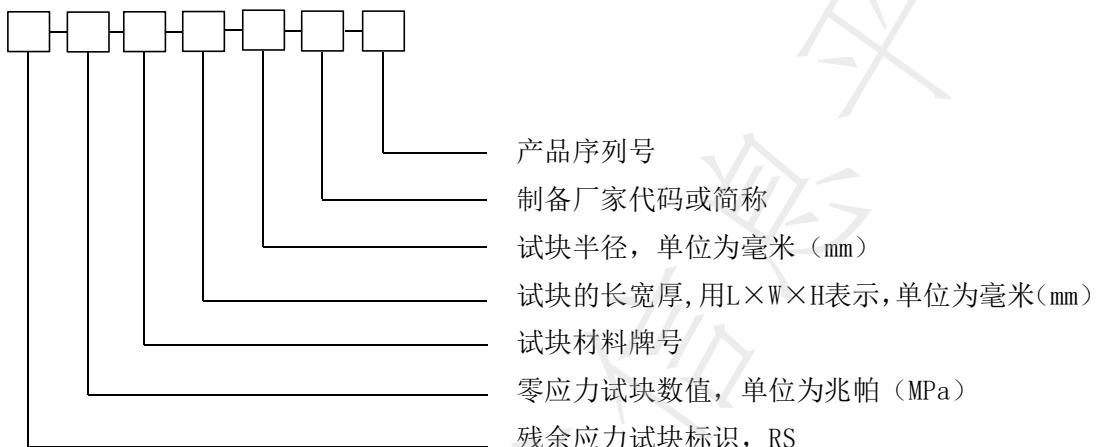
C.6.1 总则

每件试块上应刻有永久性的标准化项目标记。永久性标记不应影响试块的使用性能。

注：标记宜刻在检测部位远端。

C. 6. 2 标记格式

零应力试块的标记格式可采用下列方式：



注：试块半径用来标识试块是平板试块还是曲率试块，试块若为曲率试块则半径 R，若为平板试块则用 P 表示。

示例 1：由北京理工大学制备的、半径为 485 mm 的 L415 管道钢零应力试块，可标记为：

RS-10-L415-100×100×20-485-BIT-99。

示例 2：由北京理工大学制备的、尺寸为 100 mm×100 mm×20 mm 的 6061 铝合金零应力试块，可标记为：

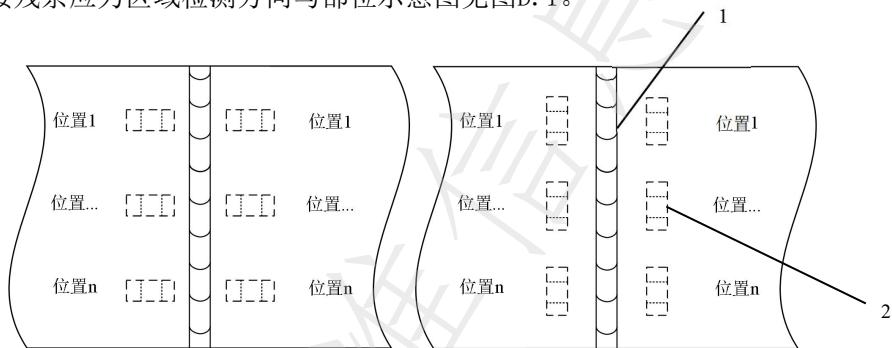
RS-0-6061-100×100×20-P-BIT-99。



附录 D
(规范性)
典型钢结构焊接区域应力检测部位示意图

本附录针对典型钢结构焊接区域残余应力分布状态,给出了残余应力检测位置选择原则和检测方向。将焊接残余应力方向和分布状态检测分为平行于焊缝和垂直于焊缝方向,焊缝为三维空间相贯线时,应沿规则曲面制备曲率换能器楔块,圆柱形表面相贯线焊缝焊接残余应力检测分别检测轴向和周向残余应力,见图D. 1~D. 13。

对接焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意图见图D. 1。

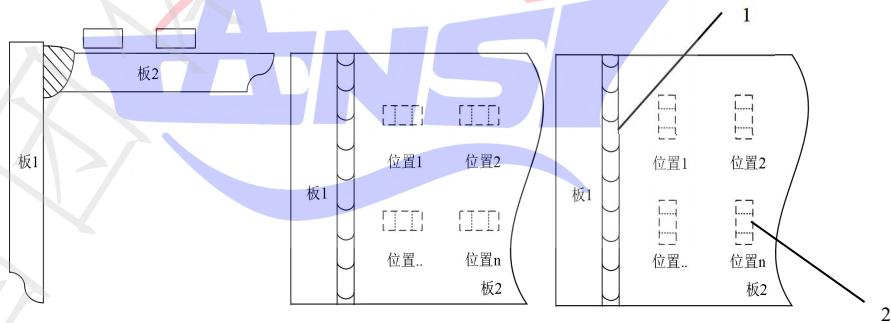


标引序号说明:

1——焊缝;
2——探头。

图D. 1 对接焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意图

板L型全熔透角接焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意见图D. 2。

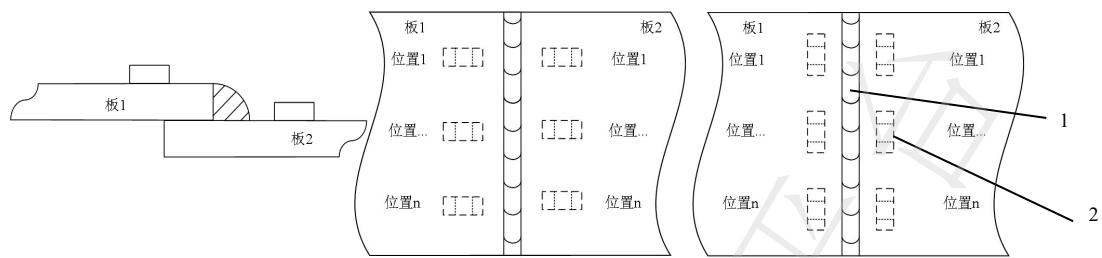


标引序号说明:

1——焊缝;
2——探头。

图D. 2 板L型全熔透角接焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意图

板搭接焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意见图D. 3。



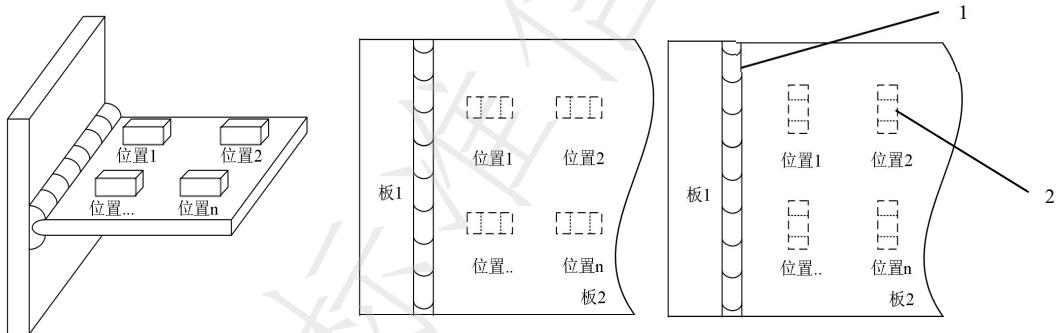
标引序号说明：

1——焊缝；

2——探头。

图D.3 板搭接焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意图

板T型焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意见图D.4。



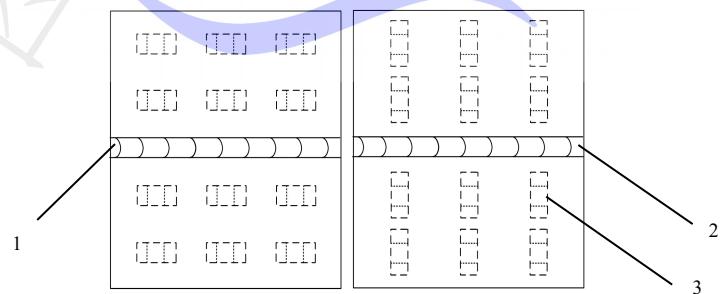
标引序号说明：

1——焊缝；

2——探头。

图D.4 板T型焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意图

焊缝起弧或收弧焊接残余应力区域检测方向与部位示意见图D.5。



标引序号说明：

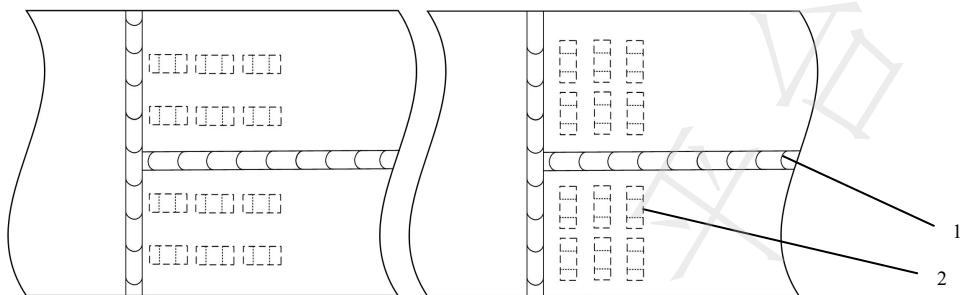
1——焊缝收弧点；

2——焊缝起弧点；

3——探头。

图D.5 焊缝起弧或收弧焊接残余应力区域检测方向与部位示意图

板对接T形交叉焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意见图D. 6。



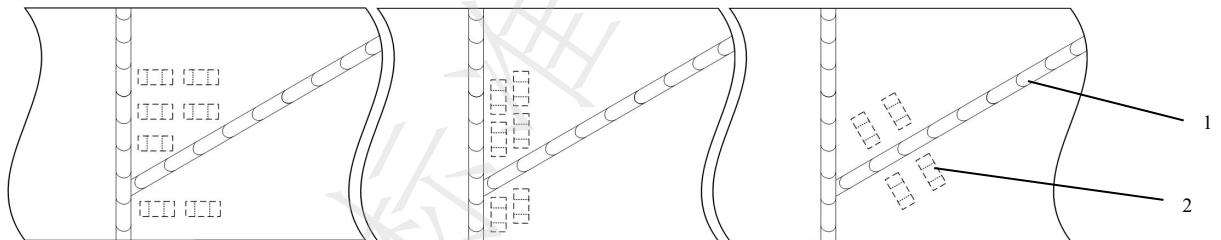
标引序号说明:

1——焊缝;

2——探头。

图D. 6 板对接T形交叉焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意图

板锐角交叉焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意见图D. 7。



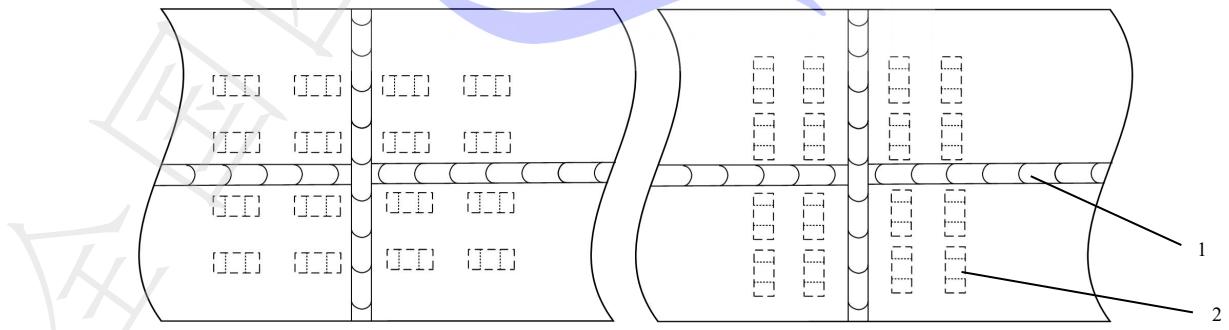
标引序号说明:

1——焊缝;

2——探头。

图D. 7 板锐角交叉焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意

板十字交叉焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意见图D. 8。



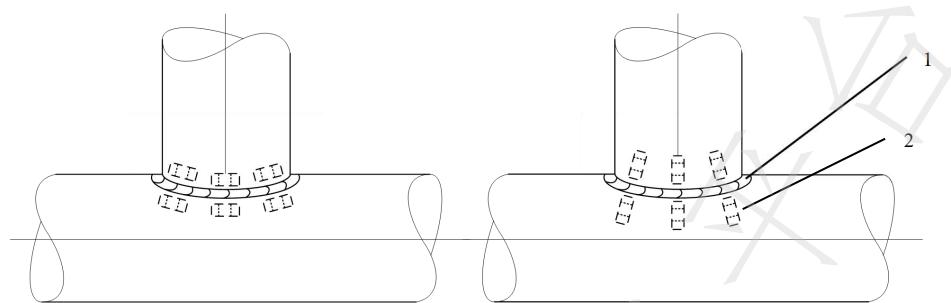
标引序号说明:

1——焊缝;

2——探头。

图D. 8 板十字交叉焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意图

管T形接头相贯线焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意见图D. 9。



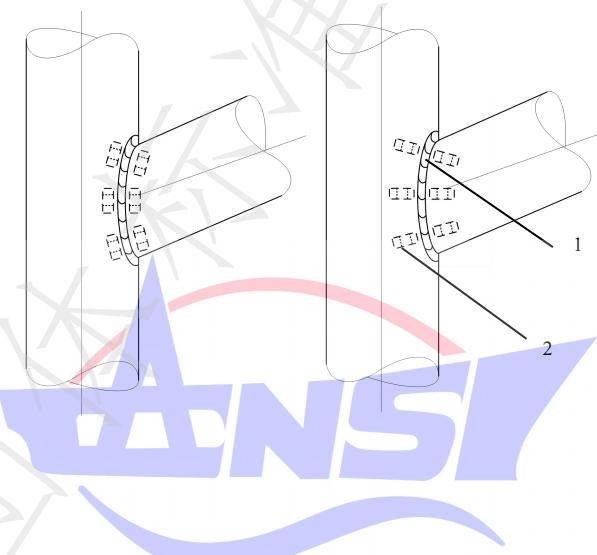
标引序号说明:

1——焊缝;

2——探头。

图D. 9 管T形接头相贯线焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意图

管Y形接头相贯线焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意见图D. 10。



标引序号说明:

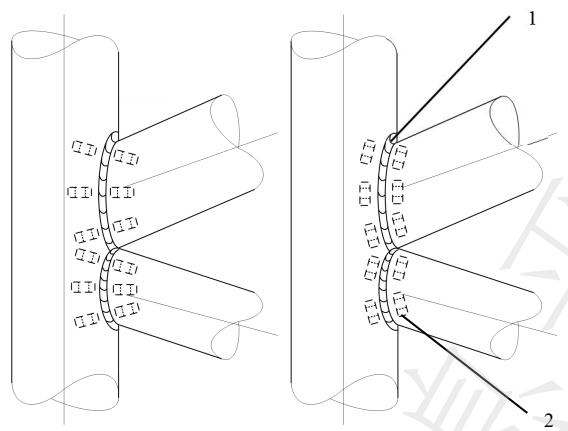
1——焊缝;

2——探头。

图D. 10 管Y形接头相贯线焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意图

管交叠K形接头相贯线焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意见图D. 11。





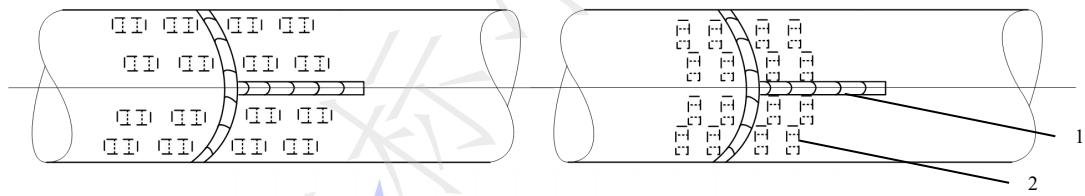
标引序号说明:

1——焊缝;

2——探头。

图D.11 管交叠K形接头相贯线焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意图

圆管T形交叉焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意见图D.12。



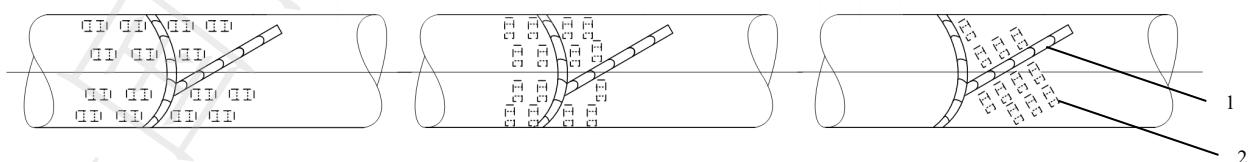
标引序号说明:

1——焊缝;

2——探头。

图D.12 圆管T形交叉焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意图

圆管锐角交叉焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意见图D.13。



标引序号说明:

1——焊缝;

2——探头。

图D.13 圆管锐角交叉焊缝焊接残余应力区域检测方向与部位示意图