

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 158—2025

船舶焊接残余应力高能声束控制方法

High energy acoustic beam control 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 原理和方法 | 2 |
| 5.1 原理 | 2 |
| 5.2 方法 | 2 |
| 6 控制系统 | 2 |
| 6.1 系统构成 | 2 |
| 6.2 上位机控制器 | 3 |
| 6.3 功率激励电源 | 3 |
| 6.4 激励器 | 3 |
| 6.5 变幅杆 | 3 |
| 6.6 激励器夹持工装 | 4 |
| 6.7 耦合剂 | 4 |
| 7 工艺要求 | 4 |
| 7.1 工艺流程 | 4 |
| 7.2 工艺参数 | 4 |
| 7.3 高能声束控制流程 | 4 |
| 8 检测和报告 | 5 |
| 8.1 检测 | 5 |
| 8.2 报告 | 5 |
| 9 安全防护 | 5 |
| 附录 A (规范性) 典型钢结构焊缝焊接区域高能声束控制部位示意图 | 6 |
| 附录 B (资料性) 控制参数 | 10 |

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、杨双旭、胡赛颐、尹鹏、蒋小伟、陈常宏、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、王少锋、朱从斌、邹国伟、黄立新、蔡向荣、肖定国、郭定明、武建新、郭灿志、王琳、张文君、李文凯、赵文政、马永江、杨光粲、靳聪、常金鹏、王文慧、虞班海、朱时洋、李洋、张建、周元凯、王锦涛、郭晋峰、张冬平、王勇、杜留法。



船舶焊接残余应力高能声束控制方法

1 范围

本文件规定了船舶焊接残余应力高能声束控制方法的人员要求、原理和方法、控制系统、工艺要求、检测和报告、安全防护等。

本文件适用于船舶及海工装备中的碳钢、不锈钢、铝合金、铜合金及钛合金等金属材料焊接残余应力的高能声束控制，其他透声材料焊接表面和内部残余应力的控制可参照使用。

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 12604.1 无损检测 术语 超声检测
- GB/T 20737 无损检测 通用术语和定义
- 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
- GB/T 38952 无损检测 残余应力超声体波检测方法
- DB13/T 1491 高温润滑脂

3 术语和定义

GB/T 12604.1、GB/T 20737和GB/T 38811界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

激励器 exciter

能够产生一定能量，且其能量中频率和幅度为可控弹性波的一种装置，通常采用压电陶瓷、磁致伸缩或电磁超声等原理制备。

[来源：GB/T 38811—2020, 3.2]

3.2

声束控制 acoustic beam control

将具有一定能量的声波或弹性波沿某一方向，并在一定范围内注入材料内部，对材料局部区域内的残余应力进行消减和均化的方法。

[来源：GB/T 38811—2020, 3.1]

3.3

变幅杆 ultrasonic horn

安装在激励器端部、与待控制应力焊接构件表面形貌一致的部件。

4 人员要求

按照本文件实施的人员，应掌握与本文件相关的技术与知识，并由雇主或代理对其进行岗位培训和操作授权后方可上岗。

5 原理和方法

5.1 原理

高能声束借助耦合介质传导进入构件内部，利用声波能量松弛和均化材料内部残余应力，起到消减、均化残余应力的作用。

5.2 方法

5.2.1 焊后控制法

由大功率激励电源产生的超声频电信号驱动激励器产生高能量超声波，声波能量通过耦合注入焊接后的构件材料内部。

5.2.2 随焊控制法

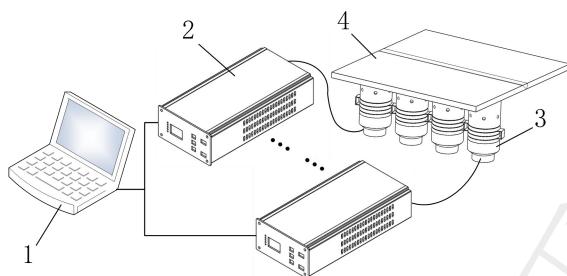
由功率激励电源产生超声频电信号，驱动功率激励器生成高能量超声波，并在焊接过程中同步将声波能量注入焊接区域。随焊控制法使用的激励器末端应安装有变幅杆，起到隔热和传递声能的作用。

6 控制系统

6.1 系统构成

焊后控制系统应由上位机控制器、功率激励电源、激励器以及外围设备(包括夹持装置和激励电压传输线缆等)构成，见图1 a)。

随焊控制系统应由上位机控制器、功率激励电源、激励器、变幅杆以及外围设备(包括夹持装置和激励电压传输线缆等)构成，见图1 b)。



标引序号说明:

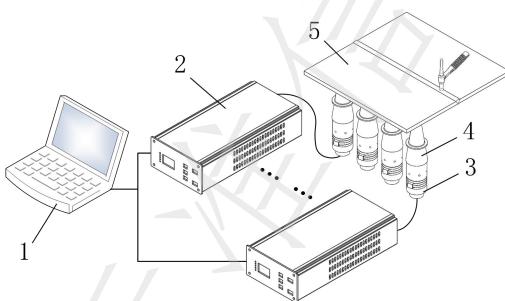
1—上位机控制器;

2—功率激励电源;

3—激励器;

4—焊接件。

a) 焊后控制法



标引序号说明:

1—上位机控制器;

2—功率激励电源;

3—激励器;

4—变幅杆;

5—焊接件。

b) 随焊控制法

图1 高能声束控制系统构成示意图

6.2 上位机控制器

上位机控制器应能控制高能声束的频率、幅度或功率、作用时间。

6.3 功率激励电源

功率激励电源的功率应与激励器的功率匹配，应具有自动跟踪激励器谐振频率的功能。

6.4 激励器

激励器工作频率应为 10 kHz~40 kHz，单个激励器功率应不小于 100 W。

6.5 变幅杆

激励器或变幅杆宜采用铝合金或钛合金等透声性能好的金属材料，在温度 300℃以下时不变形，且易加工成型；根据船舶装备焊接结构和表面曲率，设计激励器前端形廓，确保与被控制工件表面紧密贴合。

合。

6.6 激励器夹持工装

激励器夹持工装应根据激励器与激励器头组合体结构和外观形状进行设计,保证激励器能被一定的压紧力耦合到被焊件高能声束引入部位。典型结构金属制件残余应力声束调控的激励器布置见附录A。

6.7 耦合剂

耦合剂不应对工件表面产生腐蚀和损伤,宜使用满足DB13/T 1491要求的高温黄油。

7 工艺要求

7.1 工艺流程

船舶焊接残余应力高能声束控制一般包括工作前的准备、残余应力控制、调控效果检验等过程,工艺流程见图2。

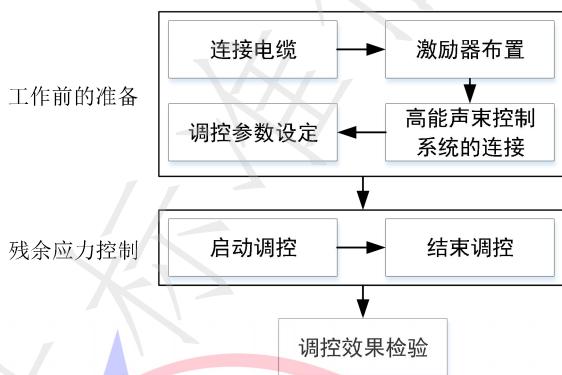


图2 焊缝焊接残余应力高能声束控制工艺流程图

7.2 工艺参数

超声波功率设定值及高能声束控制时长,应根据金属件的材料、厚度进行相应调整,见附录B。

7.3 高能声束控制流程

高能声束控制流程如下:

- 连接控制系统电缆。
- 激励器布置:
 - 对于焊后控制法,激励器应贴合在工件表面,并在贴合面均匀涂抹耦合剂。
 - 对于随焊控制法,激励器末端应安装变幅杆,变幅杆端部应贴合工件表面,并在贴合面均匀涂抹耦合剂。
- 高能声速控制系统的连接:将高能声束控制系统进行系统化连接,检查电源、信号及辅助系统工作状态,确保整套系统运行稳定。
- 调控参数设定:功率激励电源的工作频率应根据所用激励器的谐振频率设定。

- e) 启动调控:
 - 1) 对于焊后控制法，在焊缝自然冷却至室温后启动调控系统；
 - 2) 对于随焊控制法，焊接作业完成且熔池固化稳定后启动调控系统，使高能声束在焊缝冷却阶段持续作用于焊接区域。
- f) 结束调控：当达到设定调控时间，依次关闭功率电源、控制系统等。
- g) 调控效果检验：完成残余应力高能声束控制后应进行应力检测，以验证控制效果。如果残余应力水平过高或存在局部应力集中，可重复进行残余应力高能声束控制处理，直至满足设计要求或客户需要。

8 检测和报告

8.1 检测

高能声束控制后应进行如下检测：

- a) 按照GB/T 32073规定的要求，对高能声束控制后的切向焊接残余应力进行无损检测。
- b) 按照GB/T 38952规定的要求，对高能声束控制后的法向焊接残余应力进行无损检测。
- c) 将检测结果与调控要求进行比较，验证调控效果。

8.2 报告

根据焊接残余应力控制过程相关工作参数，生成残余应力控制结果报告，至少应包括如下内容：

- a) 工作日期、地点、人员；
- b) 焊接构件名称、材料、尺寸、焊接相关参数；
- c) 残余应力消减处理工艺数据（处理部位、激励器编号、超声功率、频率、处理时间）；
- d) 应力检测结果（应力检测方法、设备、检测部位、应力值）；
- e) 检测人员确认签字。

9 安全防护

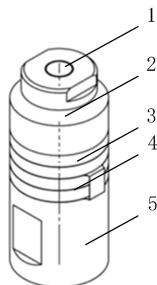
9.1 当噪声无法控制在 GBJ 87 规定的允许声级范围内时，应采用保护装置（诸如耳套、耳塞或用其他适当的方式保护）。

9.2 进入生产场地的人员应穿戴齐全的劳动保护用品。

附录 A
(规范性)

典型钢结构焊缝焊接区域高能声束控制部位示意图

本附录针对典型焊缝焊接残余应力区内残余应力分布状态,给出了残余应力控制位置选择原则。焊接残余应力控制用高能声束激励器如图 A. 1 所示:



标引序号说明:

- 1—预紧螺栓;
- 2—后驱动器;
- 3—压电陶瓷;
- 4—电极;
- 5—前驱动器。

图 A. 1 高能声束激励器结构

焊接残余应分布区域主要集中在焊缝附近,当焊缝为三维空间相贯线时,应沿规则曲面制备曲率变幅杆,焊接残余应力使用高能声束法控制时,激励器分布示意图如图 A. 2~A. 14 所示。

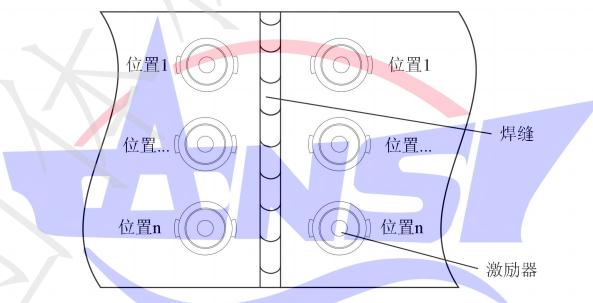


图 A. 2 对接焊缝焊接残余应力区域激励器控制部位示意图

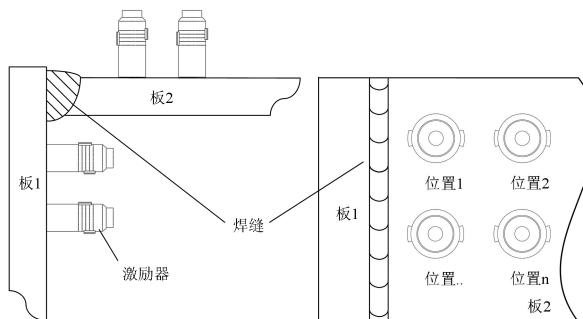


图 A. 3 板 L 型全熔透角接焊缝焊接残余应力区域激励器控制部位示意图

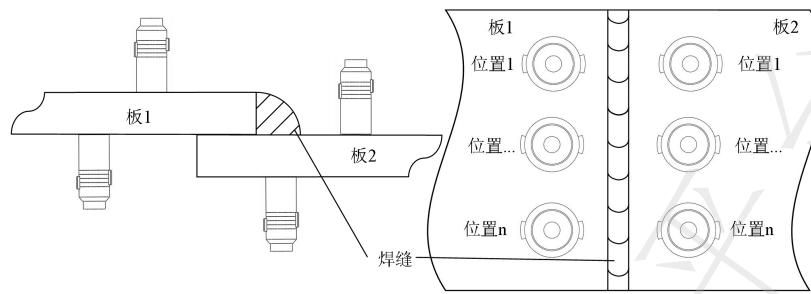


图 A.4 板搭接焊缝焊接残余应力区域激励器控制部位示意图

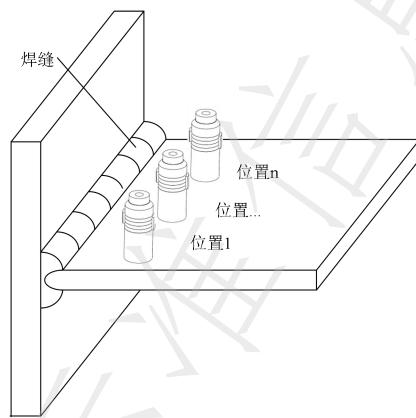


图 A.5 板 T 型焊缝焊接残余应力区域激励器控制部位示意图

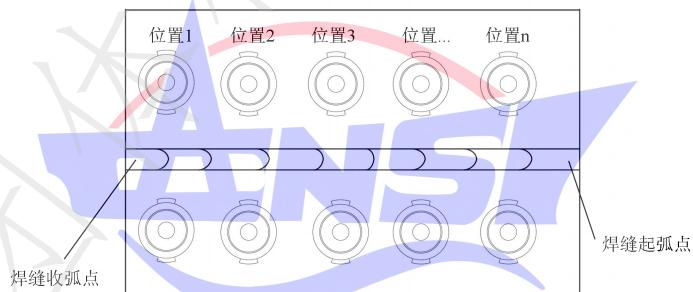


图 A.6 焊缝起弧或收弧焊接残余应力区域激励器控制部位示意图

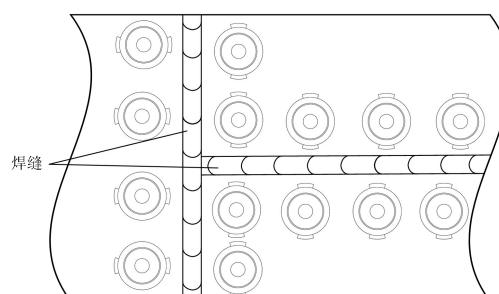


图 A.7 板 T 形交叉焊缝焊接残余应力区域激励器控制部位示意图

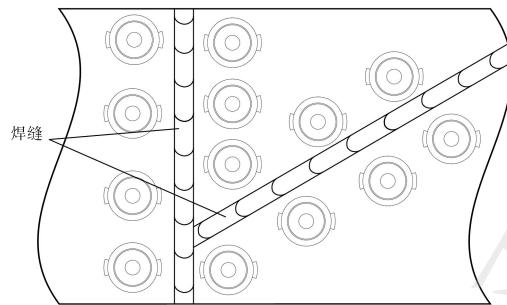


图 A.8 板锐角交叉焊缝焊接残余应力区域激励器控制部位示意图

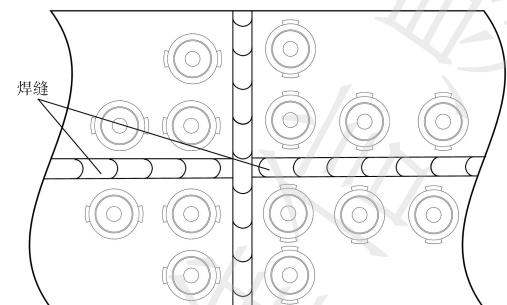


图 A.9 板十字交叉焊缝焊接残余应力区域激励器控制部位示意图



图 A.10 管 T 形接头相贯线焊缝焊接残余应力区域激励器控制部位示意图

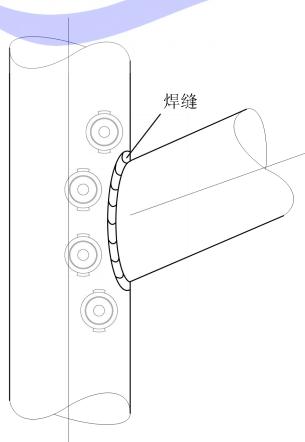


图 A.11 管 Y 形接头相贯线焊缝焊接残余应力区域激励器控制部位示意图

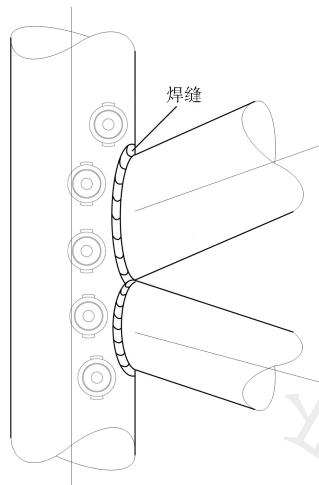


图 A.12 管交叠 K 形接头相贯线焊缝焊接残余应力区域激励器控制部位示意图

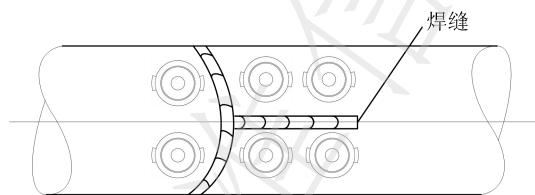


图 A.13 圆管 T 形交叉焊缝焊残余应力区域激励器控制部位示意图

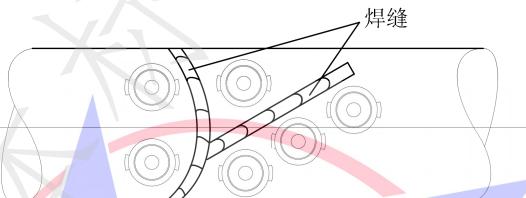


图 A.14 圆管锐角交叉焊缝焊接残余应力区域激励器控制部位示意图

附录 B
(资料性)
控制参数

超声波功率设定值及高能声束控制时长见表 B. 1～表 B. 10。

表 B. 1 2 系列铝合金焊后残余应力消减时间设定（输出功率 100W）

| 焊接构件厚度/mm | 消除时间/min |
|-----------|----------|
| <5 | 20~30 |
| 5~10 | 30~50 |
| 10~15 | 50~80 |
| 15~30 | 80~100 |
| ≥30 | 100~150 |

表 B. 2 2 系列铝合金随焊残余应力消减时间设定（输出功率 100W）

| 焊接构件厚度/mm | 消除时间/min |
|-----------|----------|
| <5 | 10~20 |
| 5~10 | 20~30 |
| 10~15 | 30~40 |
| 15~30 | 40~60 |
| ≥30 | 60~100 |

表 B. 3 船体结构钢焊后残余应力消减时间设定（输出功率 100W）

| 焊接构件厚度/mm | 消除时间/min |
|-----------|----------|
| <5 | 50~80 |
| 5~10 | 80~130 |
| 10~15 | 130~180 |
| 15~30 | 180~240 |
| ≥30 | 240~300 |

表 B. 4 船体结构钢随焊残余应力消减时间设定（输出功率 100W）

| 焊接构件厚度/mm | 消除时间/min |
|-----------|----------|
| <5 | 20~40 |
| 5~10 | 40~60 |
| 10~15 | 60~90 |
| 15~30 | 90~120 |
| ≥30 | 120~160 |

表 B.5 铜合金焊后残余应力消减时间设定（输出功率 100W）

| 焊接构件厚度/mm | 消除时间/min |
|-----------|----------|
| <5 | 30~40 |
| 5~10 | 40~60 |
| 10~15 | 60~90 |
| 15~30 | 100~110 |
| ≥30 | 110~160 |

表 B.6 铜合金随焊残余应力消减时间设定（输出功率 100W）

| 焊接构件厚度/mm | 消除时间/min |
|-----------|----------|
| <5 | 20~30 |
| 5~10 | 30~40 |
| 10~15 | 40~50 |
| 15~30 | 50~70 |
| ≥30 | 70~110 |

表 B.7 不锈钢焊后残余应力消减时间设定（输出功率 100W）

| 焊接构件厚度/mm | 消除时间/min |
|-----------|----------|
| <5 | 70~100 |
| 5~10 | 100~150 |
| 10~15 | 150~200 |
| 15~30 | 200~260 |
| ≥30 | 260~320 |

表 B.8 不锈钢随焊残余应力消减时间设定（输出功率 100W）

| 焊接构件厚度/mm | 消除时间/min |
|-----------|----------|
| <5 | 40~60 |
| 5~10 | 60~80 |
| 10~15 | 80~110 |
| 15~30 | 110~140 |
| ≥30 | 140~180 |

表 B.9 钛合金 TC4 焊后残余应力消减时间设定（输出功率 100W）

| 焊接构件厚度/mm | 消除时间/min |
|-----------|----------|
| <5 | 80~110 |
| 5~10 | 110~160 |
| 10~15 | 160~210 |
| 15~30 | 210~270 |
| ≥30 | 270~330 |

表 B.10 钛合金 TC4 随焊残余应力消减时间设定（输出功率 100W）

| 焊接构件厚度/mm | 消除时间/min |
|-----------|----------|
| <5 | 50~70 |
| 5~10 | 70~90 |
| 10~15 | 90~120 |
| 15~30 | 120~150 |
| ≥30 | 150~190 |