



中华人民共和国国家标准

GB/T 38811—2020

金属材料 残余应力 声束控制法

Metallic materials—Residual stress—Method of sound beam control

2020-06-02 发布

2020-12-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言	I
引言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 原理	1
5 设备	1
6 工作流程	3
7 处理效果比对	6
8 控制报告	6

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准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。

本标准起草单位:北京理工大学、帕博检测技术服务有限公司、上海申力试验机有限公司、冶金工业信息标准研究院、北京北方车辆集团有限公司、四川航天长征装备制造有限公司、国营内蒙第一机械制造有限公司、四川航天烽火伺服控制技术有限公司。

本标准主要起草人:徐春广、卢钰仁、张荣胜、董莉、杨浩源、李全文、潘勤学、李宏伟、蓝冬梅、肖定国、焦京俊、许永康、侯慧宁。

引 言

声束控制法是一种利用在材料内沿一定方向上传播的超声波能量,无损消减和均化残余应力的方法。该方法通常借助耦合剂,通过将激励器工作面与被调控构件表面紧密耦合,将超声波波束通过表面定向地注入材料内部,通过声束方向及其附近波动范围介质内弹性波波动能量来改变材料内局部区域的残余应力数值及其分布,达到对残余应力控制的目的。

残余应力声束控制方法能满足各种工程构件表面和内部残余应力消减和均化的需要,特别适合对在建和服役过程大型构件残余应力集中部位的现场原位消减和均化,该方法适合所有透声类材料、各种曲面形廓构件,具有无损和现场便携的特点。

声束控制法通常由激励器、大功率驱动电源和控制系统等部分构成。激励器可以采用压电陶瓷、磁致伸缩或电磁超声等原理制备,激励频率和注入能量可以根据被处理构件的材质、尺寸和形廓与残余应力控制水平等因素确定,激励电源应与激励器匹配且可控,激励器通常由工装压紧在被处理构件表面,保持紧密贴合。



金属材料 残余应力 声束控制法

1 范围

本标准规定了使用具有一定能量和方向性的声束(固体中的弹性波束)对金属材料表面和内部的残余应力进行控制的原理、设备、工作流程、处理效果比对和控制报告。

本标准适用于金属容器、钢结构、管道、轨道、车体、航空航天舱体等大型金属构件装配及焊接残余应力的现场原位消减和均化。其他非金属透声材料构件表面和内部残余应力的控制也可参照采用。

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 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

3 术语和定义

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

3.1

声束控制法 method of sound 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。

3.2

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。

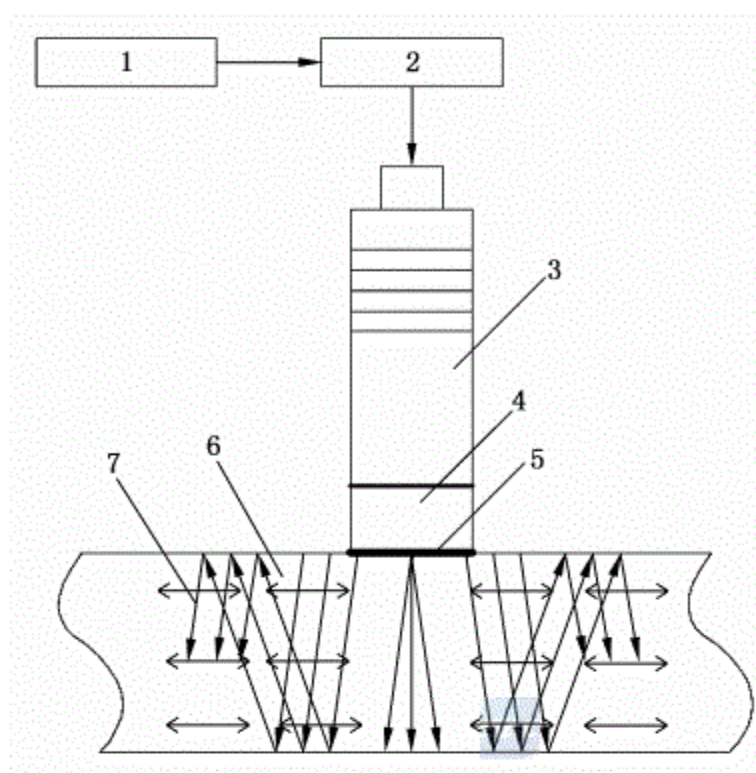
4 原理

在不改变材料的物理和力学性能情况下,声束借助耦合介质传导进入构件内部,驱动材料内部质点沿着声束方向发生振动,实现对材料内部特定方向残余应力调控。声束指向性可以使声波能量聚焦到材料表面和内部任何部位,实现材料内部局部聚焦和定向消减和均化残余应力。

5 设备

5.1 系统构成

系统由声波信号控制器、信号放大器、声束激励器、激励器楔块以及外围设备(包括夹持装置和激励电压传输线缆等)构成,见图 1 所示,箭头方向表示构件中应力的主方向。



说明：

- 1——声波信号源；
- 2——信号放大器；
- 3——声束激励器；
- 4——激励器楔块；
- 5——耦合剂；
- 6——被调控材料；
- 7——声束传播方向。

图 1 残余应力声束控制系统构成示意图

5.2 声波信号控制器

声波信号控制器应具有输出控制信号、监测激励器输出阻抗、管理定时工作流程、控制激励信号相位和幅度、控制系统启动和停止等功能。

5.3 信号放大器

将控制信号进行功率放大,同时具有激励电压和电流的反馈信号,以便能够实时监测残余应力控制过程的声阻抗变化。

注：控制信号失真会对调控效果产生影响。多路控制信号要注意相位叠加。

5.4 激励器

激励器通常为夹心式压电换能器或磁致伸缩换能器,激发时产生纵波,工作频率为 10 kHz~40 kHz,单个激励器能量大于 50 W,具体参数和性能取决于被控制材料物理性能和构件尺寸等因素。

5.5 激励器楔块

声束通过激励器端部激励器楔块注入材料内部,两个表面之间曲率应一致,以保证声束能量能完全传入材料中。

5.6 加持与固定装置

夹持装置应能确保激励器固定在材料表面,并确保工作时激励器端部与被控制材料表面紧密贴合。夹持固定装置应避免对被处理构件表面造成任何损伤。

6 工作流程

6.1 概述

声束控制过程一般为：工作前的准备、选择控制部位、选取控制模式、控制过程。

6.2 工作前准备

6.2.1 制定控制工作实施方案。

6.2.2 应确知被控制材料和构件的曲率、厚度、表面粗糙度以及现场操作空间等信息，制备被控制构件表面曲率一致的激励器端面曲面，优选激励器夹持固定装置，确定控制技术参数等；同时，应确认被控制材料部位的表面具有良好接触状态，不应有曲率突变或不规则曲面等，不应有锈蚀或油漆层等阻碍声波传播的介质。

6.2.3 激励器的工作温度通常在 25℃～80℃之间，超出该温度范围会影响控制效果。

6.2.4 选择合适的耦合剂。激励器楔块与调控工件的两个接触面之间应涂抹耐高温润滑脂（高温黄油或蓝油等）实现紧密耦合，确保声波能够有效、定向地传入被处理材料内部，同时，激励器表面对材料表面不应造成任何损伤。

6.3 选择控制部位

材料残余应力的控制部位应由相关方商定，应按照 GB/T 32073，采用无损检测方法确定构件内部残余应力大小、方向和梯度分布或集中区域。

6.4 控制模式

6.4.1 概述

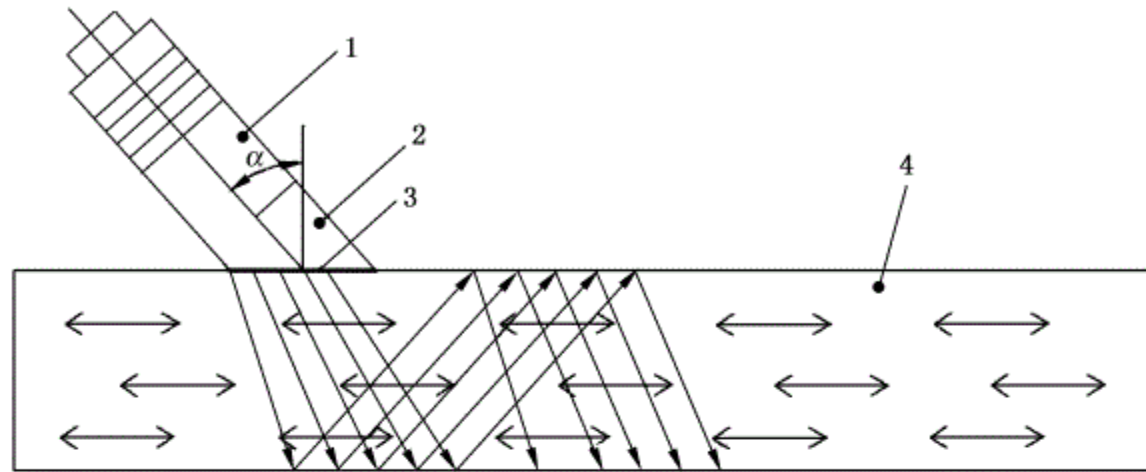
控制模式分为四类：垂直入射体波模式、斜入射导波模式、斜入射表面波模式、斜入射阵列聚焦模式。在声束控制工作时，可根据实际情况选取控制模式。

6.4.2 垂直入射体波模式

将声束激励器垂直固定放置在材料表面，声束轴线与材料表面法向一致；纵波声束在有边界的厚度方向来回反射，在界面处声波模式多次转换，形成纵波与横波的叠加波，材料质点处于无规律受迫波动，对材料内任意方向的及声束入射附近区域的残余应力起到消减和均化作用。该模式主要用于材料表面和内部集中区域的残余应力消减和均化。垂直入射体波控制模式示意图见图 1。

6.4.3 斜入射导波模式

将声束激励器按一定角度固定放置在波导构件表面，声束轴线与材料表面切平面方向保持一定角度 α ，满足导波入射条件，斜入射导波控制模式如图 2 所示，箭头方向表示构件中应力的主方向。该角度取决于激励楔块材料、波导构件材料厚度或直径、及弹性常数等，通常选取导波低阶对称或非对称模式的入射角度和频率。导波在板、管、柱等波导中以纵波与横波的叠加波形式传播，材料质点处于无规律受迫波动，对任意方向的残余应力起到消减和均化作用，利用低阶模式声能衰减小、传播远的特点，可以实现大规格构件残余应力的消减和均化；该模式主要用于整条焊缝焊接残余应力、多条焊缝焊接交点处残余应力、大规格铸锻件或金属板材内部残余应力的消减和均化。

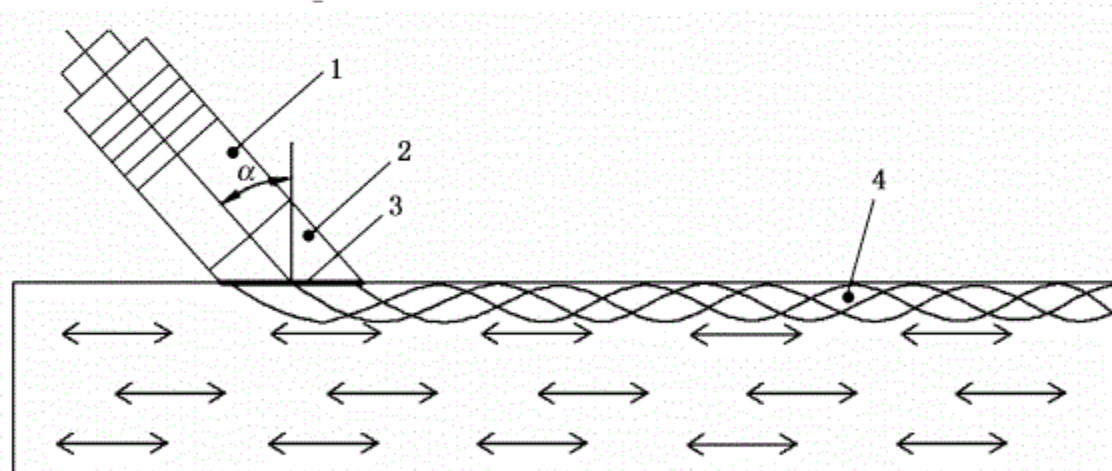


- 说明：
 1——声束激励器；
 2——激励器楔块；
 3——耦合剂；
 4——波导构件；
 α ——声束入射角。

图 2 斜入射导波控制模式示意图

6.4.4 斜入射表面波模式

将声束激励器按一定角度固定放置在固体材料表面，声束轴线与材料表面切平面方向保持一定角度 α ，满足表面波入射条件或大于第二临界入射角，斜入射表面波控制模式如图 3 所示，箭头方向表示构件中应力的主方向。该角度取决于激励楔块材料与被控制材料的声速，当入射角度为第一临界角时，在构件表面得到临界折射纵波，纵波质点波动方向与传播方向相同，该模式主要用于消除和均化存在于表面和表层内部且平行于表面方向的残余应力，在构件内部同时传播的横波主要用于消除和均化材料内部与横波质点波动方向一致的残余应力；当入射角度为第二临界角时，在构件表层内得到表面波，表面波质点运动为沿传播方向的椭圆运动，该模式主要用于消除和均化构件表面和表层内平行和垂直于表面的残余应力，适合于构件厚度远大于波长的构件表层残余应力的控制。



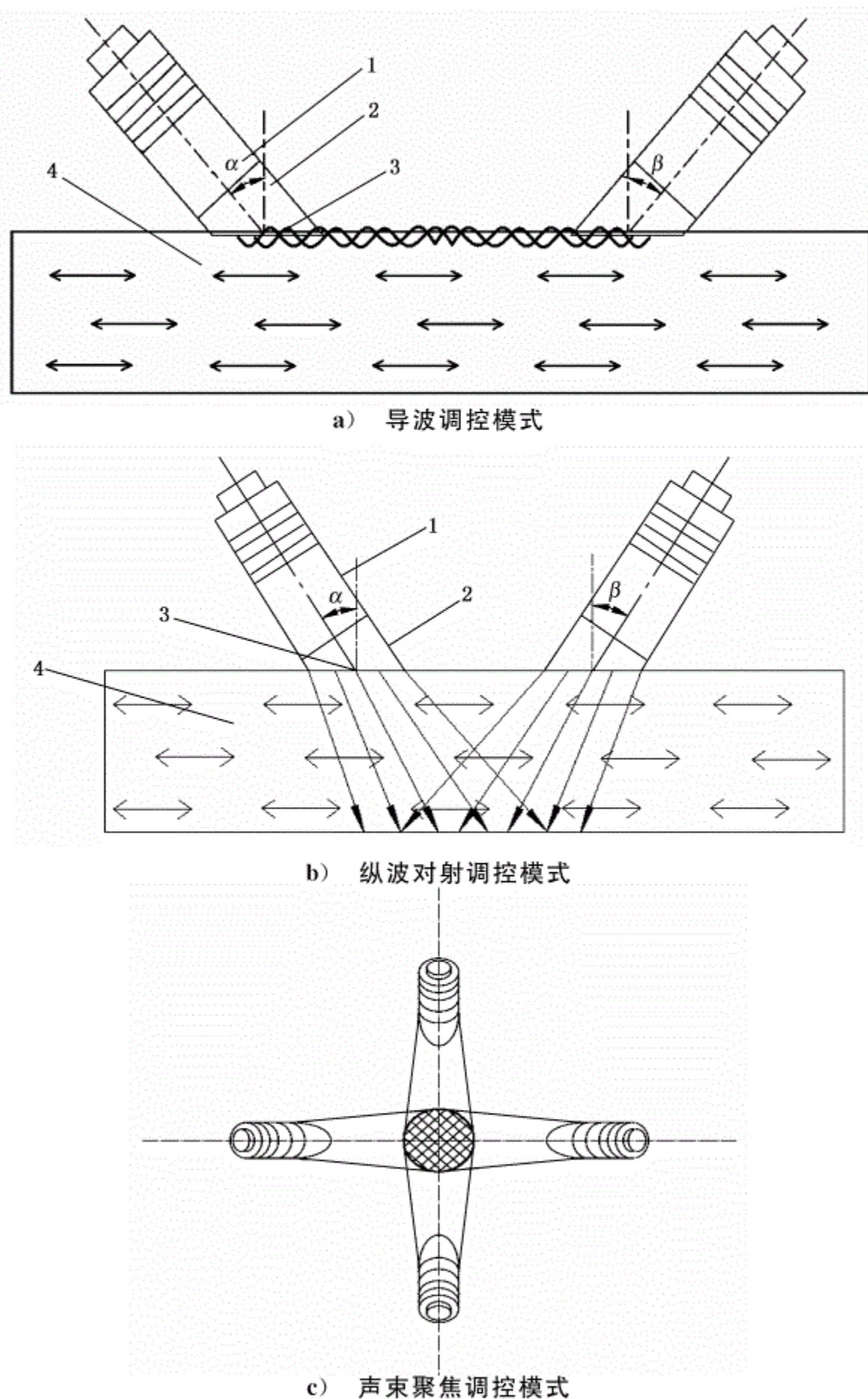
- 说明：
 1——声束激励器；
 2——激励器楔块；
 3——耦合剂；
 4——被调控构件；
 α ——声束入射角。



图 3 斜入射表面波控制模式示意图

6.4.5 斜入射阵列聚焦模式

将两个以上的声束激励器按一定入射角度(α 或 β)相对固定放置在构件表面,每个声束入射角度取决于声束相交位置,多个声束的相交区域就是声束聚焦区,控制 α 和 β 使两个以上声束在构件表面或内部任意位置相交,可以在构件表层和内部形成聚焦区域,斜入射阵列聚焦控制模式如图 4 所示,应控制相交波束的相位相同,将有助于增加聚焦能量,相干波束的质点振动模态复杂,受迫质点波动方向存在于空间各方向,这种模式主要用于消除和均化材料表层和内部局部区域各方向的残余应力。该模式主要用于材料内部或激励器无法直接接触到的构件部位的残余应力消减和均化。



说明:

- 1 —— 明声束激励器;
- 2 —— 束激励器楔块;
- 3 —— 励耦合剂;

- 4 —— 被调控构件;
- α, β —— 声束入射角。

图 4 斜入射阵列聚焦控制模式

6.5 控制过程

控制过程中要使激励器楔块与材料表面稳固密实地贴合,耦合接触力在控制过程中保持稳定。控制过程的具体操作如下:

- a) 工作系统电气连接完好,满足设备使用规范和要求;
- b) 将激励器按需要的控制模式放置在材料表面,在激励器端面均匀涂抹耦合剂,采用真空、磁吸或机械装卡等方式将激励器稳定装夹在构件表面,确保激励器端面和构件表面曲率贴合、紧密耦合;
- c) 检查工作系统连接无误后,打开系统设备开始工作,设定激励器在固有频率下工作,根据工装压紧状态和激励效果,适当调整激励器工作的最佳频率和工作时间,使得激励器一直保持在最佳的工作状态;
- d) 残余应力控制过程结束后,关闭整理好控制设备,取下夹持工装,将构件表面及声束激励器端面耦合剂清除干净;
- e) 记录过程参数。

7 处理效果比对

7.1 正(法)应力和剪(切)应力的参数值大小和梯度分布状态对产品质量和性能有重要影响,通常在结构设计、制造工艺、组合装配、检验检测和安全服役等阶段应有明确的要求和清晰的标识。

7.2 若控制前后残余应力变化幅度较小,则应考虑激励楔块与构件表面的曲率是否贴合、耦合是否良好,激励器是否工作正常,电源功率及激励器输出功率是否充分等因素导致,纠正后重新控制即可。

7.3 通常大功率控制使用 10 kHz~40 kHz 的激励频率。

7.4 通常对具有较大拉伸残余应力(指拉伸残余应力数值大于或等于 $1/4 \sim 1/3$ 被控制材料屈服强度)且相对集中的部位,进行声束控制法处理。

7.5 通常残余应力少或无、或具有压缩残余应力状态的部位,不应做残余应力消除和均化处理。

8 控制报告

在残余应力控制过程中,记录相关工作参数,生成相应的控制报告,在编写中应至少包括如下内容:

- a) 工作时间、地点、操作人员;
- b) 构件名称、材料、尺寸;
- c) 声束激励器的数量、频率及功率;
- d) 控制时环境的温度及控制前后材料表面温度;
- e) 控制时长,从激励器在最佳工作状态的开始计算直到调控结束;
- f) 控制位置,需要根据现场调控情况确定位置;
- g) 控制效果,可以采用残余应力临界折射纵波法评估调控效果;
- h) 控制人员确认签字。