

# 团 体 标 准

T/CMES XXXXX—202X

## 基于超声热振复合处理的金属薄壁球壳残余应力调控方法

Residual Stress Relief in Thin-Walled Metal Spherical Shells Using a Combined Ultrasonic Vibration and Heat

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国机械工程学会 发布

中国机械工程学会标准征求意见稿

中国机械工程学会（英文简称 CMES）是具备开展国内、国际标准化活动资质的全国性社会团体。制定中国机械工程学会团体标准，以满足企业需要和市场需求，推动机械工业创新发展，是中国机械工程学会团体标准的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国机械工程学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国机械工程学会团体标准按《中国机械工程学会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国机械工程学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国机械工程学会团体标准予以发布。

在本标准实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国机械工程学会，以便修订时参考。

本标准版权为中国机械工程学会所有。除了用于国家法律或事先得到中国机械工程学会正式许可外，不许以任何形式复制、传播该标准或用于其他商业目的。

中国机械工程学会地址：北京市海淀区首体南路 9 号主语国际 4 座 11 层

邮政编码：100048 电话：010-68799027 传真：010-68799050

网址：[www.cmes.org](http://www.cmes.org) 联系人：袁俊瑞 电子信箱：[yuanjr@cmes.org](mailto:yuanjr@cmes.org)

## 目 次

前 言 .....	III
引 言 .....	IV
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
5.1 超声电源及换能器 .....	2
5.2 加热及温度控制装置 .....	2
5.3 夹持装置 .....	2
6 处理流程 .....	2
6.1 调控前准备 .....	2
6.2 超声热振复合调控流程 .....	2
7 残余应力检测 .....	2
8 处理报告 .....	3

中国机械工程学会标准征求意见稿

## 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。中国机械工程学会不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工程学会提出。

本文件由中国机械工程学会提出并归口管理。

本文件起草单位：中国工程物理研究院机械制造工艺研究所，大连理工大学，郑州大学，四川神工科技有限公司，中国科学院金属研究所，华东理工大学。

本文件主要起草人：黄明，李加胜，夏志辉，魏兆成，郭明龙，孔金星，徐猛，李应举，李锦，房玉鑫。

中国机械工程学会标准征求意见稿

## 引 言

精密回转型金属薄壁球壳在航空航天、精密仪器等领域应用广泛，对圆度、同轴度、壁厚均匀性等形位公差要求严苛。然而，此类薄壁件整体及局部刚度较低，且易受残余应力影响，导致加工后的尺寸精度与稳定性难以保障。因此，在最终加工前对这类弱刚性零件进行残余应力消减，同时避免损伤其材料工程性能，是实现高性能制造的关键。超声热振复合方法，通过激发薄壁件的结构超声共振，并同步辅以低温热场加热，利用高频振动加速材料微观组织的弛豫过程，降低弹性畸变能，从而达到残余应力缓解的目的。

超声热振复合方法通常超声电源及换能器、辅助加热系统实现。该方法的结构共振使能量利用率高，振幅小，加热温度低（小于再结晶温度），避免了材料工程性能劣化，适用于弱刚性及对材料力学性能存在指标要求的零件残余应力缓解。

针对弱刚性金属薄壁球壳零件，本标准制定其超声热振复合方法进行残余应力缓解调控方法及工艺规范，为回转型金属薄壁球壳的残余应力调控提供有效技术支持。

# 基于超声热振复合处理的金属薄壁球壳残余应力调控方法

## 1 范围

本文件规定了超声热振复合处理缓解金属薄壁球壳残余应力的术语和定义、符号和说明、原理、方法、工艺规范及效果的评价、检测报告等。

本文件适用于金属薄壁球壳的残余应力缓解调控。

## 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 6402 钢锻件超声检测方法
- GB/T 7232 金属热处理工艺术语
- GB/T 12604.1 无损检测 术语 超声检测
- GB/T 13324 热处理设备术语
- GB/T 20737 无损检测 通用术语及定义
- GB/T 25712 振动时效工艺参数选择及效果评定方法
- GB/T 25713 机械式振动时效装置
- 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、GB/T 12604.1、GB/T 13324、GB/T 20737 界定的术语和定义适用于本文件。

### 3.1 超声热振复合处理 combined ultrasonic resonance and heat treatment

通过激发薄壁件的结构超声共振，并同步辅以不高于材料再结晶温度的热场加热的处理方法。

## 4 原理

薄壁件与超声换能器通过螺纹或工装进行刚性连接并置于稳定热场中，到温后，通过超声电源在工作频带内搜索薄壁件的谐振频率以激发超声共振。超声振动空间场及热场促进材料微观组织的弛豫，从而促进微观塑性变形，降低弹性畸变能，从而实现材料内应力的整体消减。

## 5 设备

超声热振复合处理设备构成包括：超声电源及换能器、加热及温度控制装置、夹持装置以及线缆等外围设备。

### 5.1 超声电源及换能器

超声电源应具备扫频、追频功能，工作频率范围宜在 18 kHz–22kHz。超声换能器宜采用压电陶瓷式，将电信号转换为机械振动，并通过螺纹或工装与工件刚性连接。换能器应配备冷却系统。

### 5.2 加热及温度控制装置

加热装置建议采用热处理炉或电磁感应加热方式。对于热处理炉，具体执行可参照 GB/T 16924 中关于操作流程的相关通用原则。对于铁磁性材料，可采用电磁感应加热。

### 5.3 夹持装置

装置必须与工件实现刚性连接，优先采用与工件材料兼容的螺纹连接或定制化法兰连接方式，确保连接界面的接触刚度，以最小损耗传递超声振动能量。装置与超声换能器的连接接口须标准化。

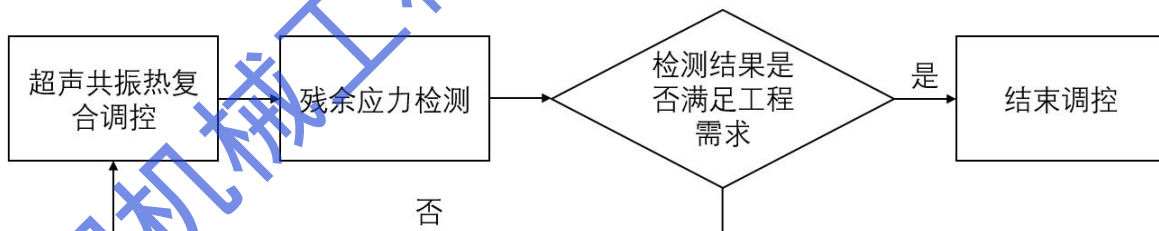
## 6 处理流程

### 6.1 调控前准备

- (a) 设备检查：确认装置线缆连接正确，换能器及加热设备无故障；
- (b) 工件装夹：将工件通过螺纹或专用工装与换能器刚性连接；
- (c) 超声频率设定：启动超声电源进行谐振频率搜索，并根据工件特性调整超声输出功率；
- (d) 温度设定：依据材料类型及工艺要求，设置加热系统的目标温度；

### 6.2 超声热振复合调控流程

待工件温度达到设定值并稳定后，启动超声振动系统，开始调控处理。调控流程示意图如下：



处理结束后，停止超声输出，工缓慢冷却至室温后方可卸件，并关闭所有设备电源。

## 7 残余应力检测

7.1 推荐使用超声临界折射纵波法的残余应力无损检测方法，准备工作参照 GB/T 32073.1 执行。

7.2 鉴于回转球壳表面的曲率影响，为在弯曲表面发生临界折射纵波，应根据公式（1）对用于弯曲表面超声楔块的入射及接受进行角度补偿  $\theta_\alpha$ ，如图 1 所示。

$$\theta_{cr} = \arcsin \frac{V_{\text{楔块}}}{V_{\text{材料}}} \pm \arcsin \frac{L}{2R} = \theta_{cr0} \pm \theta_\alpha, \quad (1)$$

其中， $\theta_{cr0}$  为平面入射时的第一临界折射角， $\theta_\alpha$  为入射点处的法线相对于平面状态下的偏转角，式中凸曲面取“+”，凹曲面取“-”， $R$  是曲面构件半径， $L$  为两换能器的中心距。

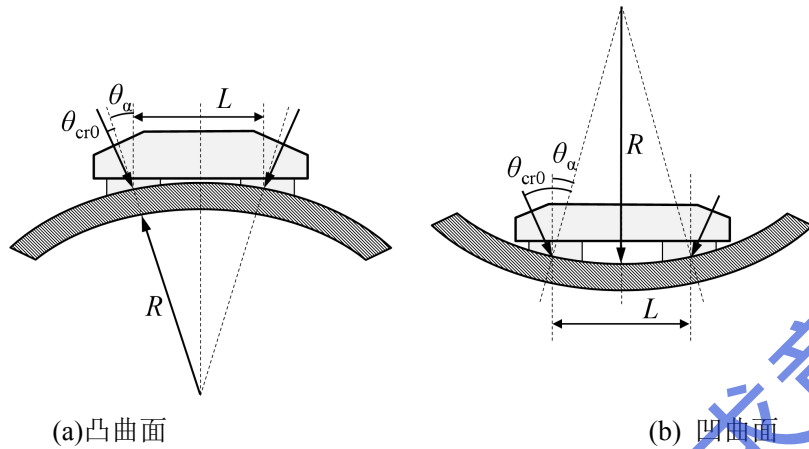


图 1 超声楔块结构原理图

7.3 对于薄壁球壳上应力测量点布置应沿回转母线均匀布置，并可根据测试需求设置多条测量路径，测点的布置数量应能反映整体的残余应力分布。

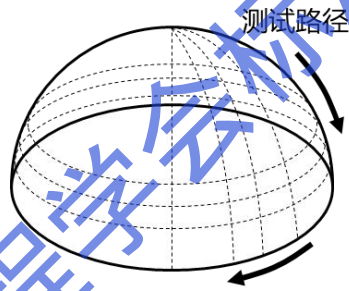


图 2 回转对称结构应力测量路径

## 8 处理报告

在残余应力调控过程中，记录相关工作参数，生成相应的检测报告，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、编号及材料；
- (c) 调控过程中热辅助温度；
- (d) 调控时长，从开始共振计算直到调控结束；
- (e) 调控效果，可以记录残余应力变化；
- (f) 控制人员确认签字。