

# 北京理工大学检测与控制研究所

2023 年科研进展

北京理工大学检测与控制研究所以北京理工大学一级国家重点学科（机械工程）和部级重点实验室（先进加工技术国防重点学科实验室）为依托，多年来一直从事无损检测与控制理论与技术的教学和科研工作。研究所主要面向国防科技工业和国民经济发展的前沿及生产需求，重点开展残余应力超声无损检测与调控技术、（单双）机械手超声检测技术、超声显微扫查检测技术、复杂回转类零件激光测量技术、材料弹性参数与涂层厚度测量技术、机器视觉检测技术等研究工作。

研究所现有教职工 16 人，其中教授 1 人、副教授 5 人、高级实验师 1 人、科研助理 2 人、技师 4 人，在站博士后 2 人，在读博士研究生及硕士研究生 40 余人。实验室面积 400 余平方米，拥有残余应力超声检测与高能声束调控系统、高频超声显微镜、（单双）机械手超声自动检测系统、螺栓紧固应力检测系统等多种检测设备。

一年来，研究所承担和完成了多项重大项目，比较典型的包括：致力于多维度应力场定量表征与测量协调一致性的国家重点研发计划项目；针对铣削、焊接、增材等多工艺国防高精尖构件低应力制造的基础加强项目；面向铝合金铸造动力传动箱体电磁超声应力检测与调控的动力传动专项；含能材料的低应力制造等。

## 1 超声应力检测与低应力制造技术

### 1.1 定值应力试块

通过设计一种残余应力梯度分布定值试块来实现对残余应力检测系统的标定和校准，从而保证残余应力检测的可靠性。通过与试块不同位置处呈梯度变化的定值拉伸或压缩应力进行多样点比较，得到检测值与实际值的差值，从而实现检测系统的校准。

通过调节螺栓的方向和拧紧程度，改变缺口的张合状态，发现缺口内侧的变形和 U 形试块外侧的变形情况恰好相反，根据弹性力学的原理，变形量和应力值一一对应，不同状态的应力也会由一侧逐步过渡到另一侧，即在试块的不同区域产生对应的定值残余应力梯度分布，实现一次拧紧便可同时通过拉伸和压缩残余应力来对超声法检测残余应力系统进行校准。残余应力定值试块结构及其应力仿真如图 1 所示。

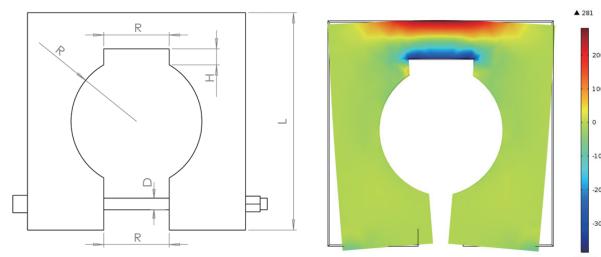


图 1 残余应力定值试块结构及其应力仿真

### 1.2 铝合金板低应力冲压

在曲面结构制造中，通常采用厚板铣削的方

式，但是厚板铣削存在去材量大，加工效率低的问题。因此，提出采用折弯成形的方法进行曲面结构制造，节约资源的同时大大提高加工效率。材料折弯过程中难免出现大范围的机加残余应力集中区域，这将成为导致构件变形的主要诱因，将直接导致整体构件制造完整性遭到破坏。因此，就需要对其进行构件残余应力的超声无损检测以及应用高能声束进行应力调控，保持构件内残余应力幅度低而分布均匀的状态。低应力冲压试验现场如图 2 所示，低应力冲压模式下，构件变形更明显且应力下降达到 90%，均化率优化接近 50%。



图 2 低应力冲压试验现场

### 1.3 金属薄壁管类构件焊接残余应力调控

焊接作为一种机械加工领域常见的加工方式具有广泛的应用，然而，由于金属管道焊接后不可避免的产生不均匀分布的残余应力场，应力集中会导致焊缝处变形甚至开裂，会严重影响构件后续使用过程中的稳定性、力学性能和寿命。传统的调控残余应力方法有自然时效、热处理、机械冲击等方法。自然时效法耗时长，占用大量场地，调控效果不可控；热处理法能耗高，污染严重，难以处理大型管道构件；机械冲击法易造成管道构件表面损伤。传统方法如今已不再适用，利用高能超声波调控残余应力的方法在多个领域中逐渐得到验证，该方法具有耗时短、能耗低、不造成构件损伤等优点，适用于管道焊接残余应力消减与均化。利用高能超声波调控残余应力方法的关键在于夹持高能超声激励器和调控楔块通过耦合介质紧密耦合于管道焊缝残余应力集中区域，将高能超声波按照设定要求注入到焊接残余应力集中区域，利用高能超声波在构件内产生的弹性

波能量消减和均化管道焊接产生的残余应力。金属薄壁管类构件焊接应力调控工装如图 3 所示。

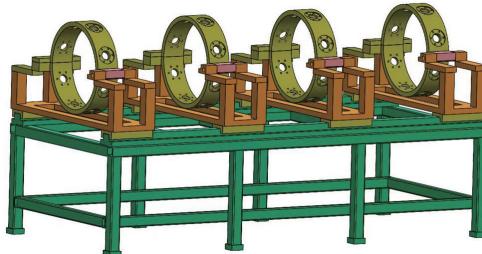


图 3 金属薄壁管类构件焊接应力调控工装设计

### 1.4 超声应力检测现场示范应用

超高强钢壳体作为火箭弹燃烧室外壳，也是火箭弹的主体结构部分，其直线度极大地影响火箭弹的发射精度。在实际生产过程中，壳体经第一次旋压后，在进行后续真空退火过程中存在开裂现象，严重影响其成品率；在焊接后热处理过程中，退火淬火时，壳体存在弯曲变形等现象，严重影响壳体的直线度；同时，在机加工成品后，壳体在存放时，也存在缓慢弯曲、直线度降低的问题。为了找到产生上述问题的原因，解决问题，对某型号火箭弹用 D406A 超高强度钢壳体成型与制造过程残余应力的演变进行了研究，利用超声法和电磁法对壳体成型与制造过程中的残余应力进行了表征，结果如图 4 所示。

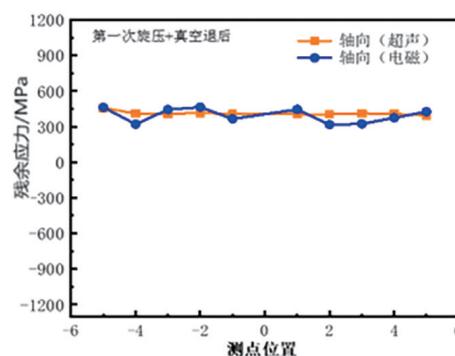


图 4 D406A 超高强度钢壳体残余应力分布折线图

## 2 高精度残余应力超声分辨力检测技术

检测分辨力考核的是一个仪器设备的检测精度，为验证检测分辨力指标，设计改进了超声检测算法，提高了检测精度，增加了计算信号点数，以满足高精度检测的要求。

首先设计了模拟加载试验，利用电信号进行可行性验证。为提高检测精度，将检测仪信号插值点从 50 个改到了 200 个。

应力模拟加载试验系统组成如图 5 所示。利用任意波形发生器产生谐波串信号作为参考信号模拟试件的零应力状态，随后利用信号发生器相对超声信号收发卡激励信号的延时功能产生 **10 ns** 的延时信号用来模拟试件在基准应力状态下的超声信号状态，最后再在基准延迟信号的基础之上施加 **0.1 ns** 的增量延迟，用以模拟增量应力状态下的超声信号。设试件的应力系数为 **5 MPa/ns**（典型铝合金的材料性质），则在此模拟条件下，对于 **5 MHz** 信号，仪器的分辨力试验结果如表 1 所示。

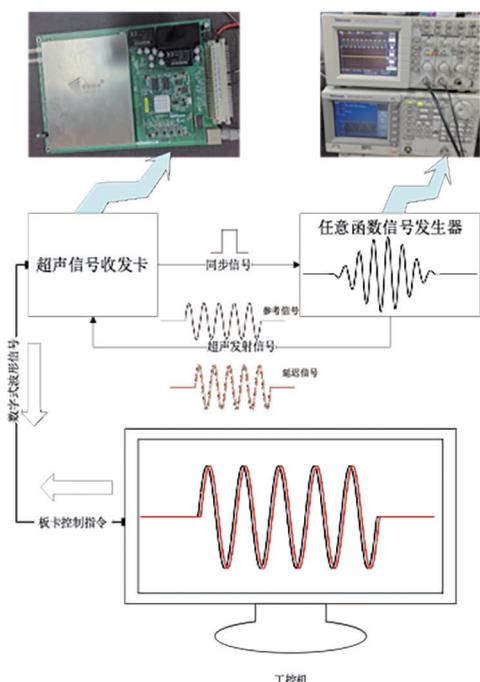


图 5 应力模拟加载试验系统组成

表 1 仪器分辨力模拟试验结果

理论应力 /MPa	应力检测值 /MPa
40.0	40.0
	40.0
	40.0
	40.0
	39.8
40.4	40.4
	40.4
	40.4
	40.2
	40.4

### 3 高铁轴承滚道压缩应力梯度超声预置技术

高铁轴承、传动轴承、大型船舰用轴承、机床轴承等轴承构件内表面内部三维余应力分布状态对轴承加工精度与变形、耐磨损性能、耐烧蚀能力、保形能力和服役可靠性与寿命有重要影响。轴承构件是制造工业中的重要部件，长期工作于重载荷、多次循环接触疲劳应力以及滑动磨损等环境，失效形式以磨损失效、强度失效、腐蚀失效等为主。

在加工过程中，轴承构件内部会产生和驻留残余应力，尤其是轴承构件需要经过毛胚的锻造成型、车削、磨削、渗氮、滚压或喷丸、表面淬火等塑性和冷热加工过程，从而在轴承构件内部产生和驻留按一定梯度分布的残余应力。掌握和控制轴承构件内部的残余应力状态变得十分重要，通过超声无损检测的方法测量内部残余应力梯度分布状态，再通过超声滚压方法在内部预置残余应力，控制内部残余应力的分布状态，即轴承滚道压缩应力梯度超声预置技术。超声滚压预置应力系统如图 6 所示。



图 6 超声滚压预置应力系统

超声滚压表面强化技术是一种新型的材料表层后处理工艺，利用预置初始静压力和动态超声冲击力耦合的方式对材料表层进行往复加工，在高能超声的作用下，对材料产生超声软化效应，获得更深的表面纳米硬化层和有益的残余应力。基于（GB/T 38811—2020）《金属材料 残余应力 声束控制法》采用高能声束残余应力调控技术对坯料进行应力调控，去除材料内部残余拉应力后，在材料的内部预置出残余压应力，以形成较密的晶体组织结构，从而达到表面强化的效果，进而提高轴承的接触疲劳寿命，解决了多项技术难题。超声滚压预置残余应力分布曲线如图 7 所示。

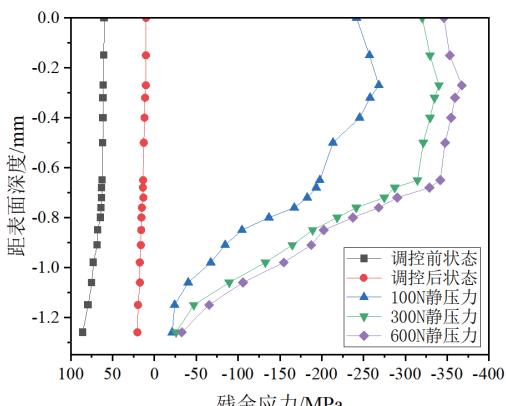


图 7 超声滚压预置残余应力分布曲线

#### 4 钢结构多通道超声服役应力监测系统

服役强度多通道超声监测系统主要由超声信号收发模块、继电器阵列通道切换模块、传感器及软件控制子系统等构成，其原理如图 8 所示。其中通道切换功能通过工控机连接继电器控制卡对继电器阵列的信号控制，以及继电器切换开关实现。

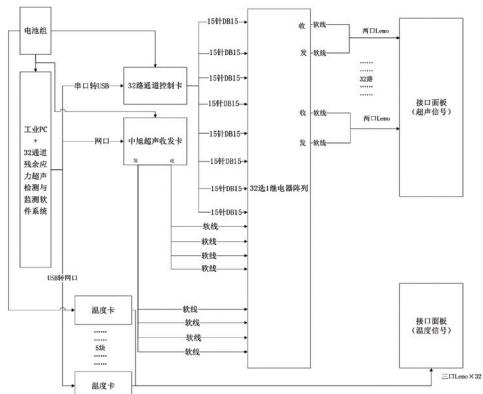


图 8 多通道应力检测 / 监测系统原理示意

软件系统实现系统参数设置、声弹性应力系数标定、基准零应力声时标定、应力值的检测和监测等功能。系统参数设置功能满足对 32 路通道控制器、超声检测收发卡、材料温度检测器硬件设备开放参数的设置需要。应力系数标定功能支持声弹性应力系数值手工录入或手工录入拉伸应力数值自动计算声弹性应力系数值。基准零应力声时标定功能支持基准零应力声时的现场标定，也可以实现远程数据库的网上标定。波形显示功能支持时域信号波形图缩放和图形化方式选中信号波形范围。

多通道结构应力监测系统主要由超声收发卡、工控机、超声信号线、超声探头等硬件及应

力监测和计算软件系统构成。工控机及超声收发卡之间通过网络数据传递信号，信号主要包括工控机对收发卡的下行命令参数以及超声收发卡上传的超声信号数据。由工控机和监测软件系统对超声信号数据进行处理并形成各个通道的应力监测数据。工控机及超声信号收发卡实物如图 9 所示。

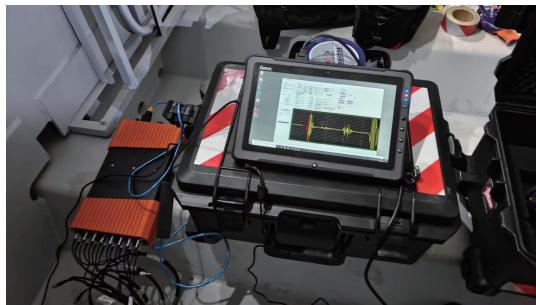


图 9 工控机及超声信号收发卡实物

该检测系统所应用的超声探头为专门针对钢结构设计的集成探头（见图 10）。探头内的楔块角度由钢结构的声速参数等综合确定，探头内的收发换能器也采用了集成化的压电材料结构。此外该探头还具备磁吸结构，使用时可以贴合在试件表面，从而减少了人为把持因素对检测结果的影响。



图 10 信号线及探头布置示意

在开启结构动态应力监测之前需要配置好各个通道的超声信号收发参数，如增益、采样范围、采样起点以及闸门参数等。监测系统的软件界面如图 11 所示。基于多通道并行工作的思想，在应力计算方面，该监测系统对多路信号采集、处理及分析做了专门的设置。考虑到不同通道的监测环境的微小差异以及被检试件材料和探头本身的差异，需要对多路信号收发系统设计独立的信号采集参数。此外对于应力计算来说，互相关运算所截取的波形长度对于计算结果来说至关重要，因此每个通道的闸门参数也是独立设置的，这样便可以保证对于存在细微差距的各个通道 A 扫波形可以适应性的截取计算。在准备工作做好之后

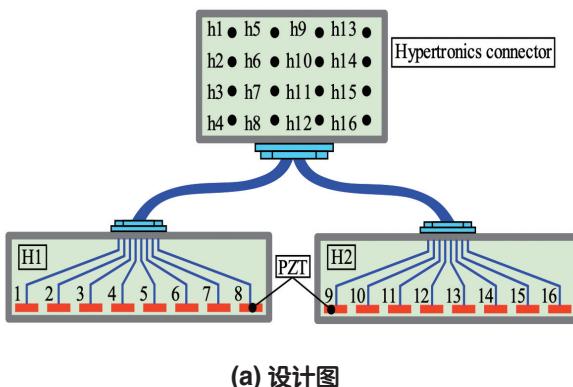
便可以对钢结构进行动态应力监测。



图 11 监测系统软件界面

## 5 复合材料 Lamb 波检测技术

复合材料弯曲结构广泛应用于航空领域。分层损伤的发生和扩展会降低在用弯曲结构的安全性。**Lamb** 波作为一种较高损伤敏感性的检测工具，可以有效地检测出分层损伤。研究了线性阵列 PZT 相位延时方法对 **Lamb** 波模态控制的效果，实现了单一模态 **Lamb** 波的控制与增强，可分别激励出 **A<sub>0</sub>** 和 **S<sub>0</sub>** 模态 **Lamb** 波对不同尺寸的分层损伤进行检测。仿真结果表明，相较于 **S<sub>0</sub>** 模态 **Lamb** 波，**A<sub>0</sub>** 模态 **Lamb** 波对分层损伤表现出高敏感性，根据信号差异系数与分层损伤尺寸的强相关性可以对分层损伤进行定量。设计了一种一维线性梳状换能器（见图 12）用以激励出 **A<sub>0</sub>** 模态 **Lamb** 波，根据如图 13 所示的 **Lamb** 相控阵检测系统对 CFRP（碳纤维增强复合材料）弯板进行检测试验。如图 14 所示，根据仿真数据的 Hermite 插值结果，采用高斯函数拟合出分层损伤尺寸与信号差异系数的关系表达式，可对分层损伤进行准确的定量，拟合表达式对分层损伤定量的绝对误差不大于 0.806 3 mm，相对误差不大于 8.063%。文章的试验和建模方法、信号分析方法和拟合表达式可为 CFRP 分层损伤检测提供参考。



(a) 设计图



(b) 实物

图 12 小型化线性阵列换能器设计图和实物

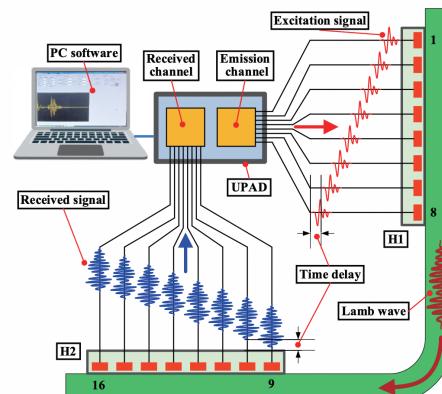


图 13 Lamb 相控阵检测系统

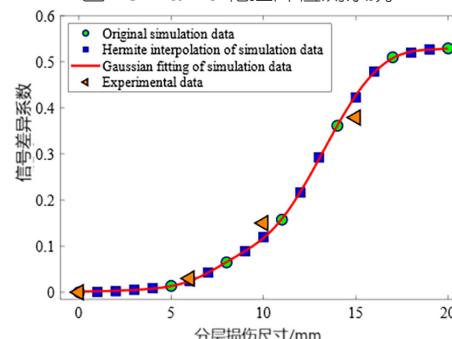


图 14 分层损伤尺寸与信号差异系数之间的关系

## 6 结语

2023 年，北京理工大学检测与控制研究所超声残余应力检测与高能束低应力制造、超声无损检测系统研制与应用、复合材料检测技术等方面取得了丰富的研究成果。研究所将继续致力于解决工程实践中各种无损检测技术难题，培养无损检测技术人才，促进无损检测技术的发展，愿与业界同仁开展各种交流与合作！

北京理工大学检测与控制研究所

徐春广 供稿

2024 年 02 月