

# 油气管道焊接残余应力超声无损检测与原位调控技术

徐春广<sup>1\*</sup>, 王俊峰<sup>1</sup>, 宋剑峰<sup>1</sup>, 田海兵<sup>1</sup>, 蔺廉普<sup>2</sup>, 饶心<sup>3</sup>

1 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081

2 北京理工大学自动化学院, 北京 100081

3 中国石油西部管道公司, 乌鲁木齐 830000

\* 通信作者, xucgbit@263.net

收稿日期: 2016-10-18

**摘要** 基于声弹性理论, 本文研究了油气管道中超声波与应力的关系, 分析了超声临界折射纵波产生的原理、方法和技術。为了确保检测值的准确性和可溯源, 进一步研究了超声波残余应力检测的校准技术, 建立了超声应力检测与校准系统; 研究了高能超声与残余应力场的相互作用关系, 通过有效控制高能声束和声激励模式改变构件表面和内部残余应力场状态, 实现了对在役机械构件局部残余应力分布的原位消减和控制, 提高了服役机械构件整体强度、抗疲劳和耐腐蚀能力, 增强了构件使用寿命、安全性和可靠性, 并在油气管道焊接残余应力的检测和调控中得到了应用。

**关键词** 残余应力; 超声波; 无损检测; 原位调控

## 0 引言

残余应力是一种固有应力, 是当构件没有外部因素作用时, 在构件内部保持平衡而存在的应力。机械加工过程中, 如焊接、切削、磨削、表面滚压、喷丸、挤压、拉拔和轧制等, 不可避免地都会产生残余应力。

油气管道长期处于输送介质脉动载荷的工作状态, 残余应力集中的现象普遍, 长年使用管道易进入诱发腐蚀、导致裂纹、出现泄漏等缺陷频发的老龄期<sup>[1]</sup>。目前, 由于服役管道老化, 缺乏有效的无损检测技术和准则, 管道运行安全形势严峻, 需研究适合服役管道安全状态无损检测方法, 以及时检测出服役管道残余应力集中区域并进行调控, 恢复管道的健康状态, 确保管道服役安全。本文针对以上情况, 研究了油气管道焊接残余应力超声无损检测与原位调控技术。

残余应力的检测技术始于 20 世纪 30 年代, 发展

至今共形成了数十种检测方法。将这些方法按照其对被测构件损伤与否分为有损伤、半损伤和无损伤 3 大类。有损伤的方法有切片法、轮廓法等, 半损伤的方法有盲孔法、环芯法、深孔法等, 有损法和半损法都属于应力释放的范畴; 无损的方法<sup>[2-4]</sup>有 X 射线衍射法、中子衍射法、磁性测定法、扫描电子声显微镜法和超声波法等。2012 年, 意大利 Rossini 教授对比分析各种检测方法后认为, 超声波法<sup>[5]</sup>具有高分辨率、高渗透力和对人体无伤害的特点, 是残余应力无损检测发展方向上最有前途的技术之一。

对在役油气管道残余应力控制方面, 不论是传统的自然时效法, 锤击法, 热时效法, 还是目前的频谱谐波、电击法、磁脉冲法等都有其局限性, 都无法实现对油气管道焊接残余应力的现场原位调控或消减。尽管超声冲击消除残余应力技术<sup>[6-7]</sup>是最近几年发展起来的热门技术, 其用微型高强度金属变幅杆冲头冲

引用格式: 徐春广, 王俊峰, 宋剑峰, 田海兵, 蔺廉普, 饶心. 油气管道焊接残余应力超声无损检测与原位调控技术. 石油科学通报, 2016, 03: 442-449

XU Chunguang, WANG Junfeng, SONG Jianfeng, TIAN Haibing, LIN Lianpo, RAO Xin. Ultrasonic nondestructive testing and in situ regulation technology of residual stress for oil and gas pipelines. Petroleum Science Bulletin, 2016, 03: 442-449. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.040

击金属表面, 来提高表面压缩残余应力, 频率越来越高, 可以达到超声的振动频率, 但是这种技术在金属表面产生压缩残余应力的同时, 机械构件表面由于受到变幅杆冲击影响, 必将带来冲击损伤甚至是裂缝或微小裂纹, 这些损伤同样会导致管道表面产生非包容性破坏, 影响到管道的安全性和可靠性。

本文基于声弹性理论, 研究了超声波与应力的关系, 探讨了超声波残余应力检测的校准技术, 将超声应力检测与校准系统应用到管道焊接残余应力的分布检测中, 取得了良好的应用效果; 同时, 采用了一种残余应力的高能超声消减技术, 将机械构件置于高能声场中, 利用外加高功率声能改变管道表面和内部残余应力状态, 实施对残余应力状态的局部定量消减。

## 1 超声检测理论

### 1.1 声弹性理论

声弹性理论基于有限变形连续介质力学, 从宏观现象角度来研究弹性固体应力状态与弹性波波速之间的关系。理论研究表明: 弹性波在有应力的固体材料中的传播速度不仅取决于材料的二阶弹性常数、高阶弹性常数和密度, 还与残余应力有关, 表现为声弹性效应。压缩或拉伸残余应力将影响超声波传播速度。

初始坐标系下的应力介质中弹性波波方程(声弹性方程)<sup>[8]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial X_j} \left[ (\delta_{ik} t_{jl}^i + C_{ijkl}) \frac{\partial u_k}{\partial X_l} \right] = \rho_i \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中,  $\delta_{ik}$  为 Kronecker delta 函数;  $\rho_i$  代表固体受力状态下的密度;  $u_i$  是动态位移;  $X_j$  表示质点的位置矢量;  $C_{ijkl}$  取决于材料常数和初始位移场, 称为等效刚度,  $t_{jl}^i$  为初始坐标描述的固体受力状态下柯西应力。

由方程(1)看出, 声弹性方程非常复杂且为非线性的, 可将其简化为线性公式。假设超声波为平面波, 在初始坐标下可以表示为<sup>[9]</sup>:

$$u_i = U_j \exp[ik(N_j X_j - Vt)] \quad (2)$$

式中,  $k$  为波数,  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $N$  为平面波的单位法线方向, 即传播方向的方向余弦;  $U$  为振幅;  $V$  为波速;  $t$  为时间。

对均匀变形的情况, 初始坐标的声弹性方程(1)可以简化为:

$$(C_{ijkl} + \delta_{ik} t_{jl}^i) \frac{\partial^2 u_k}{\partial X_j \partial X_l} = \rho_i \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)中, 可得:

$$[C_{ijkl} N_j N_l + (t_{jl}^i N_j N_l - \rho^i V^2) \delta_{ik}] U_k = 0 \quad (4)$$

其特征方程为:

$$|D_{ik} - \rho^i V^2 \delta_{ik}| = 0 \quad (5)$$

式中, 声张量为:

$$D_{ik} = C_{ijkl} N_j N_l + \delta_{ik} t_{jl}^i \quad (6)$$

当固体为各向同性时, 方程(4)可以解析地表达出来, 具体推导详见文献<sup>[10]</sup>。由此, 可在笛卡尔坐标系下, 建立固体中超声波的传播速度与应力的方程如下<sup>[11]</sup>:

沿应力方向传播的纵波, 如图 1

$$\rho_0 V_{111}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left[ \frac{\lambda + \mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2l \right] \quad (7)$$

式中,  $\lambda$  和  $\mu$  表示固体的二阶弹性常数,  $l, m$  表示三阶弹性常数,  $\rho_0$  表示固体发生变形前的密度,  $\sigma$  代表施加的单向应力(拉应力为正, 压应力为负)。

### 1.2 临界折射纵波法

根据 Snell 定律, 当纵波从波速较慢的介质传播到波速较快的介质中时, 若折射角达到  $90^\circ$ , 则形成的纵波即为临界折射纵波(L<sub>CR</sub>)<sup>[11]</sup>, 而入射角称为第一临界角。以从有机玻璃透声楔入射到平面钢板为例, 第一临界角的计算公式为:

$$\theta_{L_{CR}} = \arcsin(V_1/V_2) \quad (8)$$

式中,  $V_1$  为透声楔块中的纵波波速;  $V_2$  为钢中的纵波波速。

对于曲面构件, 第一临界角  $\theta_{L_{CR}}$  有:

$$\theta_{L_{CR}} = \arcsin\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \pm \frac{90L}{\pi R} \quad (9)$$

式中,  $L$  为传播声程,  $R$  为曲面构件的曲率半径。对于凸曲面取+, 凹曲面取-。

通常钢的声速为 2 900 m/s, 则第一临界角为  $27^\circ$ 。

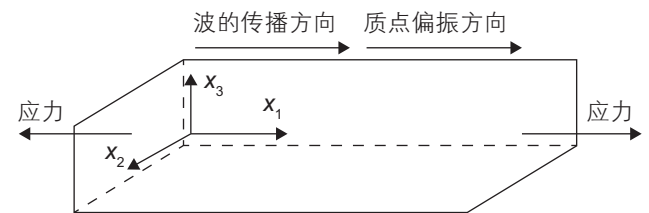


图 1 沿应力方向传播的纵波(波速有 3 个下标。如  $V_{ABC}$  表示, 第 1 个下标表示波的传播方向, 第 2 个下标表示质点的偏振方向, 第 3 个下标表示单轴应力作用的方向)

Fig. 1 The longitudinal wave propagates along the stress direction

## 2 残余应力调控理论

根据理论分析,残余应力的本质是晶格弹性畸变,而晶格弹性畸变很大程度上是由晶格之间的约束力引起的,在实验现象的基础上,从残余应力存在和产生的本质出发,采用位错点阵模型,分析位错周围的约束力场与弹性波动之间的相互作用,给出高能超声对残余应力的调控理论模型。

高能超声提供的离功率超声源距离为  $x$  的质元所获得的能量为<sup>[12]</sup>:

$$E = \frac{1}{2} \rho_0 V_0 u^2 + \frac{1}{2} \frac{(A \sin 2\pi f t)^2 V_0}{\rho_0 c^2} \exp \left[ -2x \left( C F d^3 f^3 + \frac{2\pi^2 f^2 K^2}{\rho_0 c^3} \left( \frac{1}{c_v} + \frac{1}{c_p} \right) \right) \right] \quad (10)$$

式中,质元体积为  $V_0$ ,起始声压为  $P_0$ ,密度为  $\rho_0$ ,超声波声速为  $c$ ,声压振幅为  $A$ , $C$ 为常数, $f$ 为超声频率, $F$ 为各项异性因子, $d$ 为质元晶粒直径, $K$ 为热传导系数, $c_v$ 定容比热, $c_p$ 定压比热。

由方程(10)可知,高能超声提供金属内部质元的能量与金属材料本身的密度  $\rho_0$ 、材料的定容比热  $c_v$ 、定压比热  $c_p$  等固有属性成正比,与超声在其内部传播的速度  $c$  成反比;同时,与超声本身提供的声压振幅  $A$  和频率  $f$  的平方成正比。

当超声波提供给金属内部质元的能量大于晶格之间的约束力的势能时,金属内部的残余应力将得以释放。这从理论上初步证明了利用高能量超声波是可以控制残余应力的,控制的效率和效果与材料特性(弹性模量、屈服强度、密度和声阻抗等)、激励频率、耦合方式以及控制的局部位置等因素有关。

## 3 系统构建

### 3.1 检测系统

残余应力超声检测系统根据声弹性原理研制而成,其原理如图2所示。系统使用超声临界折射纵波,可检测工件表面以下 1.5 mm 深度(与换能器的频率有关),实现对残余应力快速无损检测,准确判断和评估出残余应力的大小及拉压状态。其主要的技术参数如表1所示。

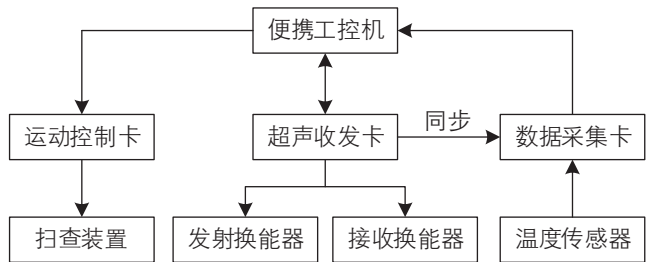


图2 残余应力超声检测系统原理框图

Fig. 2 Principle diagram of the residual stress ultrasonic testing system

表1 检测系统主要技术参数

Table 1 The main technical parameters of the testing system

系统适用材料范围:	金属、玻璃、陶瓷等透射材料
系统适用工件类别:	平板、轴类、盘类、管道、螺栓、涂层下等
检测范围:	$\pm \sigma_s$ (被测材料屈服强度)
检测误差:	$\pm 20$ MPa
温度范围:	0~40 °C
检测深度:	0.5~150 mm
每个检测点的时间:	5~30 s

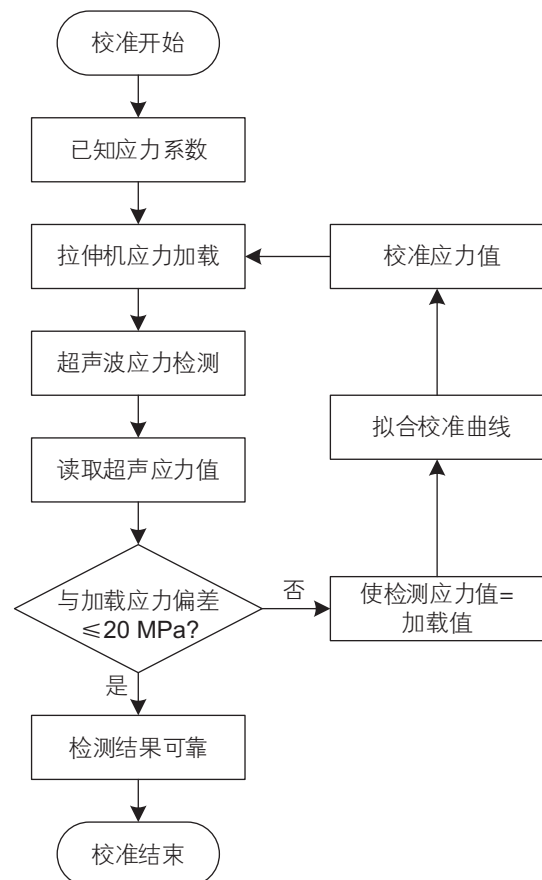


图3 系统校准流程图

Fig. 3 Flow diagram of the system calibration

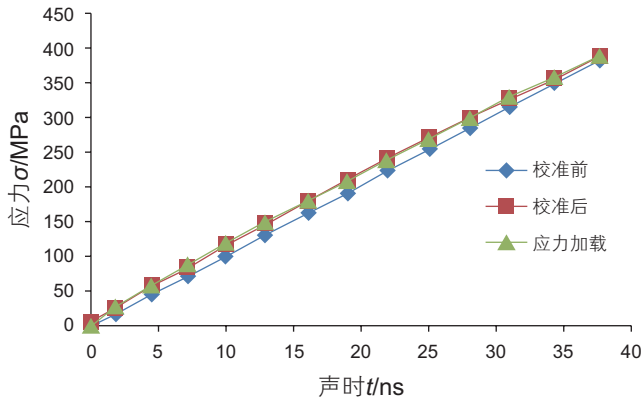


图4 拉伸试验应力校准曲线图  
Fig. 4 Stress calibration curve graph of tensile tests

### 3.2 校准方法

校准法的流程图如图3所示。图4是对2A14铝合金进行应力校准时的声时—应力曲线图，从图中看出，校准后的曲线更接近实际加载的应力曲线，该校准方法同样适用于钢等金属材料。

### 3.3 调控系统

残余应力调控系统包括高能超声发生器、高能超声换能器，以及外围设备(包括换能器真空夹持装置、激励电压传输线缆、耦合剂等)，其系统组成框图如图5所示，其技术指标如表2所示。

## 4 实验与分析

在西气东输过程中，为提高输油速度及输油量，输油过程中须在管道内部进行打压。管道包括直焊缝与环焊缝，管道在打压输油的过程中，因焊缝残余应力的影响，焊缝附近很容易因应力过大而出现裂纹，对输油管线造成无法估计的损失。

#### (1) 西气东输某段管道焊缝残余应力检测

管道残余应力检测过程中，轴向位置是以距环焊缝(两相邻管道之间的焊缝)的距离进行定位，如图6所示，管道焊缝残余应力检测实物图如图7所示。

以距环焊缝4700mm处为第一测试点，其他测试点为在此位置基础上依次递增40mm，将传感器装置置于直焊缝附近的上述测试点上，测量得到的焊缝残余应力分布如图8所示。

通过图8发现，两次测量数据基本变化不大，且变化趋势一致，说明系统的重复性较好，在距环焊缝4860mm位置处应力突变较为明显，此处可能为拉应

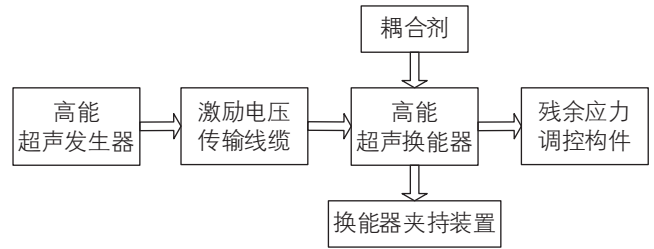


图5 残余应力高能超声调控系统组成框图  
Fig. 5 Diagram of the residual stress high energy ultrasonic regulation system

表2 调控系统主要技术参数

Table 2 The main technical parameters of regulation system

功能	指标
调控材料	铝合金、钢、铜等金属材料
调控频率	15~30 kHz
调控功率	单个高能超声换能器≥100 W
调控当量面积	≤50 mm × 50 mm，可调
应力调控降低率	一次调控降低≥30%，最终降低率≥50%，调控次数≤3次
单点一次调控时间	≤30 min
有效调控深度	≤18 mm

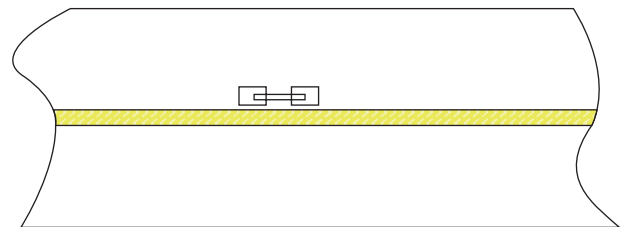


图6 管道焊缝残余应力检测示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of testing positions for pipe welding residual stress



图7 现场测试实物图  
Fig. 7 Test arrangement

力集中位置。数据整体偏高的原因是测得的是相对应力值，零应力参考点选取不准确，将压应力默认为零应力。

(2)某作业区管道焊缝残余应力检测

对西气东输某加气站油气管道(材料L360，屈服强度 360 MPa，抗拉强度 460 MPa)的一处焊缝裂纹处进行了残余应力检测。管道(直径 356 mm，厚度 15 mm)有 2 条 2 mm 深的裂纹，如图 9 所示。残余应力检测前，裂纹已经进行了打磨处理。检测方向均为垂直于焊缝。通过超声应力检测，可得管道裂纹附近的应力分布曲线如图 10 所示。

从管道两处 2 mm 深裂纹附近 9 个区域的应力分布图可见，其第 2 个区域(见红色圈)拉应力偏大(218 MPa)，需要对其长期监测，其它区域应力较为正常。

(3)打压管道应力原位监测实验

利用 5 台检测仪分 5 路探头，分别监测管道残余应力较大点处的 4 个周向和 1 个轴向应力变化，现场如图 11 所示，考虑到安全因素，管道未被打爆，最大压强达到 14 MPa。监测点具体位置信息如表 3，检测前，对初始应力值做归零处理，连续打压监测的应力

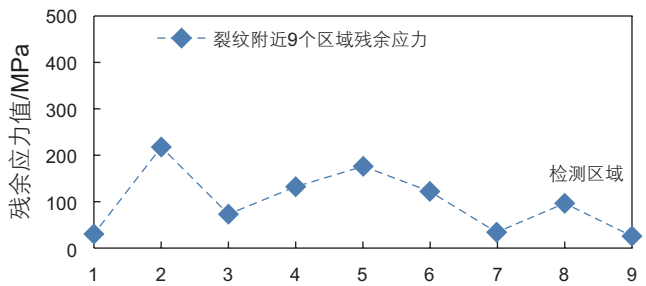


图 10 管道裂纹附近九个区域残余应力分布图

Fig. 10 Pipe residual stress distribution diagram near the pipeline crack



图 11 打压管道应力原位检测现场

Fig. 11 Testing physical picture of pipeline stress in situ field

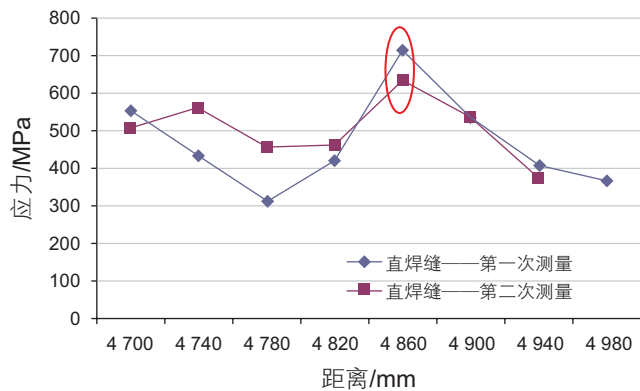


图 8 焊缝残余应力分布

Fig. 8 Welding residual stress distribution

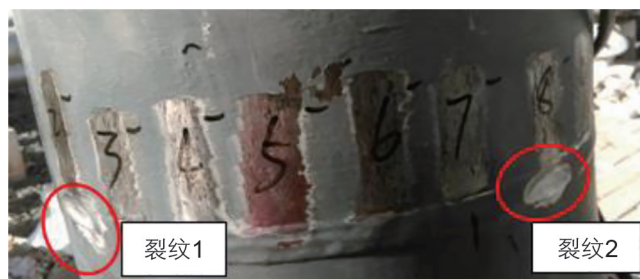


图 9 管道裂纹附近检测位置图

Fig. 9 Testing position diagram near the pipeline cracks

表 3 监测点具体信息

Table 3 Information of monitoring positions

编号	布置方向	检测位置	残余应力值 / MPa
1号机	周向	1号管首端焊缝处	180
2号机	周向	1号管 44 处	193
3号机	周向	1号管与 2号管焊缝处	170
4号机	周向	2号管 67 处	140
5号机	轴向	2号管末端焊缝处	200

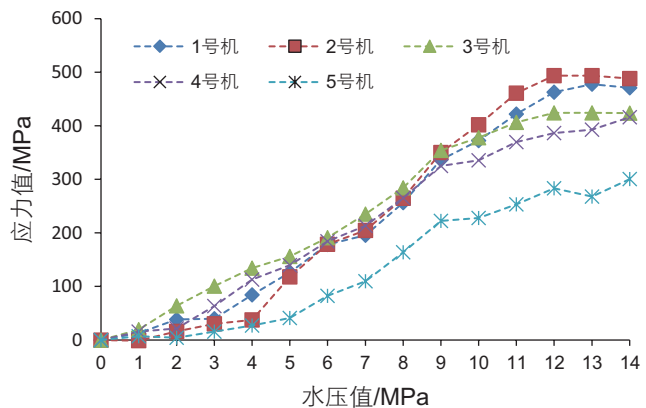


图 12 连续打压监测的应力走势图

Fig.12 Monitoring stress graph in continuous bulge test

走势如图 12 所示。

从监测数据曲线看出：①周向区域的应力值随水压升高的变化大，轴向的应力约周向的一半，这与理论分析吻合；②周向的检测点(1、2、3 和 4 号机)在 12 MPa 水压后都发生应力不再线性增大的现象，可能出现塑性变形；③ 2 号机监测的位置原始残余应力值最大，因此最先达到屈服状态；④ 4 号机监测点在水压 14 MPa 时仍未屈服，说明该点仍然安全，因此可以初步认为管道焊接残余应力的阈值应  $\leq 140$  MPa。

(4) 油气管道焊接部位残余应力消减实验

使用残余应力高能超声调控仪对管道焊缝附近应力值过高的区域做高能超声调控作业，调控 30 分钟，调控现场如图 13 所示。

分别对 3 处应力较大的区域进行高能超声调控，



图 13 管道焊接残余应力调控现场  
Fig. 13 Regulation site picture of pipeline welding residual stress

对比调控前后 3 处位置的残余应力值，如图 14 所示。从图中数据可知，调控前后 3 处应力都有所下降，由此可知，高能超声调控设备可以无损的消减油气管道的表面和内部残余应力。

(5) 斜入射管道焊接部位残余应力消减实验

在 X70 管道上选取 77 个点为应力检测点，77 个待测点间隔 30 mm 均匀分布，如图 15 所示。选焊缝应力集中区域作为关键点调控，使用残余应力高能超声调控仪进行应力调控 50 分钟，如图 16 所示。对比调控前后的应力变化情况，如图 17 所示。

5 结论

(1) 基于声弹性理论，得到了应力与声速之间的线

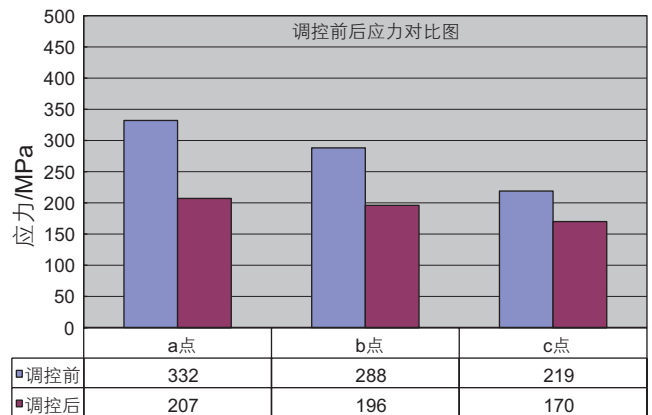


图 14 实验效果图  
Fig. 14 Experimental results

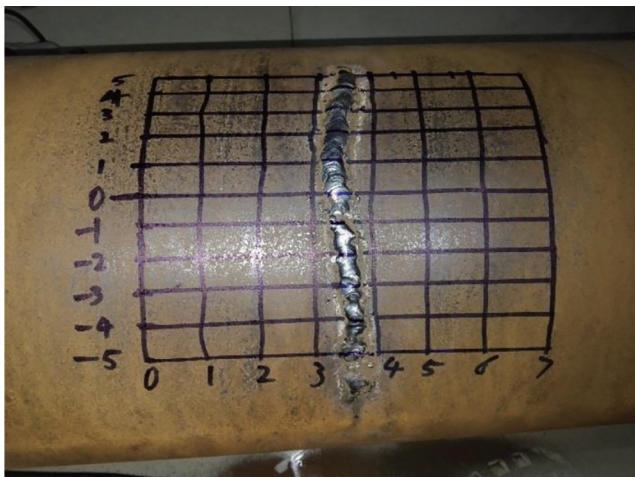


图 15 管道应力检测位置图  
Fig. 15 Diagram of testing stress position of pipeline



图 16 应力调控现场图  
Fig. 16 Stress regulation site

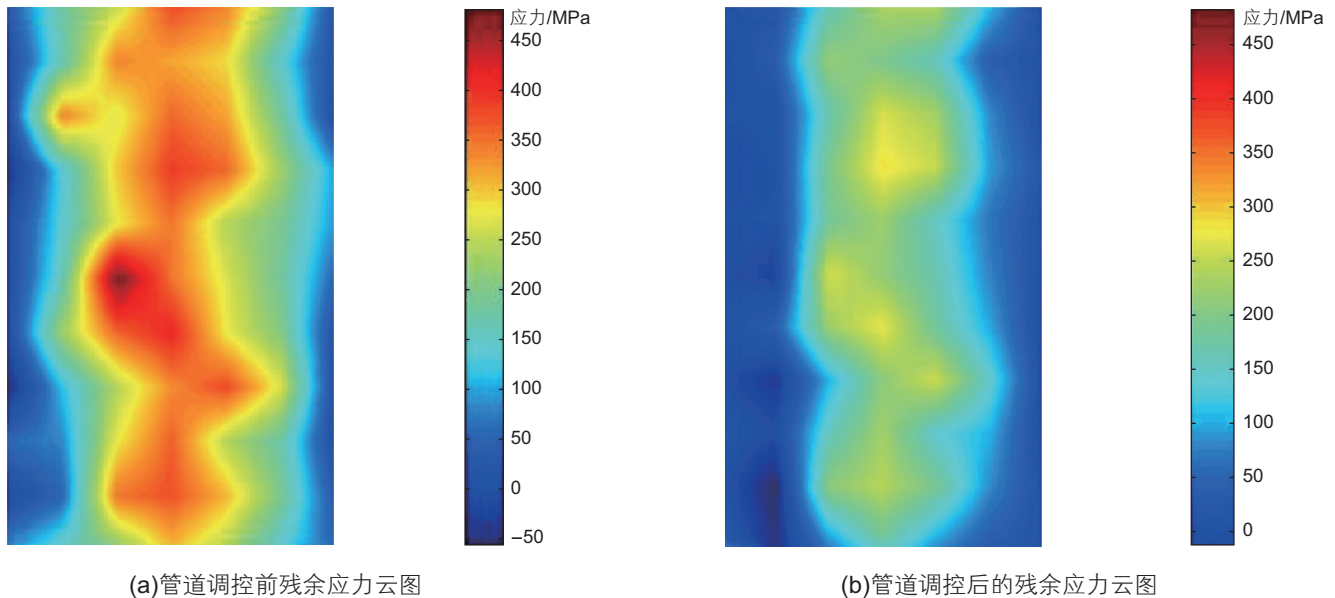


图 17 调控前后应力对比图

Fig. 17 Comparison diagram of stress changed before and after the regulation

性关系。根据 Snell 定律，超声波在入射到被检测材料中时折射形成的临界折射纵波(LCR波)可用于检测构件一定深度内平行于LCR波传播方向的应力状态。

(2)研究了利用拉伸试验机对超声应力检测的校准方法，通过校准，使得系统的实际精度达到  $\pm 10$  MPa 以内。

(3)将油气管道焊接构件置于高能声场中，利用外

加高功率声能改变焊接件表面和内部残余应力场状态，较好地实现了对油气管道焊接残余应力状态的原位局部定量调控。

(4)通过实验应用与结果分析表明：残余应力检测与原位调控技术具有较好的准确性、实用性以及应用领域的广泛性，能够很好的解决管道焊接残余应力检测和消除问题，确保服役管道安全运行。

## 参考文献

- [1] 刘泓晔, 廖元洪, 程娜, 等. 石油天然气管道的安全问题探讨[J]. 化工管理, 2014, (17):79. [LIU H Y, LIAO Y Q, CHENG N, et al. Discussion on the safety of oil and gas pipeline[J]. Chemical Enterprise Management, 2014, (17):79.]
- [2] GANGULY S, FITZPATRICK M E, EDWARDS L. Use of neutron and synchrotron X-ray diffraction for evaluation of residual stresses in a 2024-T351 aluminum alloy variable-polarity plasma-arc weld[J]. Metallurgical and Materials Transactions.2006, 37(2):pp.11-20.
- [3] WITHER P J. Mapping residual and internal stress in materials by neutron diffraction[J]. Comptes Rendus Physique. 2007, 8(8):806-820.
- [4] ROSSINI N S, DASSISTI M, BENYOUNIS K Y, et al. Methods of Measuring Residual Stresses in Components[J]. Materials and Design. 2012, 35: 572-588.
- [5] 杨铭伟, 王时英. 超声振动时效机理分析及试验研究[J]. 中国农机化学报, 2016, (02):70-74. [YANG M W, WANG S Y. Feasibility analysis and experiment research of ultrasonic vibratory stress relief[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(2):70-74.]
- [6] 应之丁, 高立群, 范庆锋. 超声冲击技术消除转向架构架焊接残余应力试验方案分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, (01):44-46+51. [Ying Z D, GAO L Q, FAN Q F. Experiment elimination plan of residual stress on bogie frame welding joint with ultrasonic impact technology. Urban Mass Transit, 2016, (01):44-46+51.]
- [7] TATSUO T, YUKIO I. Acoustical birefringence of ultrasonic waves in deformed isotropic elastic materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 1968, 4: 383-389.
- [8] HUGHES D S, KELLY J L. Second-order elastic deformation of solids[J]. Physics Review, 1953, 92(5): 1145-1149.
- [9] PAO Y H, SACHSE W. Acoustoelasticity and ultrasonic measurement of residual stresses[J]. Physical Acoustics, 1984, 17: 62-140.

- [10] ROSE J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [11] CHAKI S, KE W, DEMOUVEAU H. Numerical and experimental analysis of the critically refracted longitudinal beam[J]. Ultrasonics, 2013, 53: 65-69.
- [12] SONG W T, PAN Q X, XU C G, et al. Benchmark of residual stress for ultrasonic nondestructive testing [C]. Proceedings of 2013 IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing: New Technology & Application, Beijing: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2013:73-76.

---

## Ultrasonic nondestructive testing and in situ regulation technology of residual stress for oil and gas pipelines

XU Chunguang<sup>1</sup>, WANG Junfeng<sup>1</sup>, SONG Jianfeng<sup>1</sup>, TIAN Haibing<sup>1</sup>, LIN Lianpo<sup>2</sup>, RAO Xin<sup>3</sup>

*1 School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China*

*2 Department of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

*3 Petro-China West Pipeline Company, Urumqi 83000, China*

**Abstract** Based on acoustoelasticity theory, the relationship between ultrasonics and stress in oil and gas pipelines is researched. Further, the principle, method and technology of ultrasonic critically refracted longitudinal waves are analyzed. In order to ensure accuracy of test results and realization of quantity traceability, the calibration technology of ultrasonic testing for residual stress is studied. Then the ultrasonic stress testing and calibration system is established. For in situ regulation of residual stress, the interactive relationship between high energy ultrasonics and the residual stress field is studied. It is seen that the surface and internal component residual stress states are changed by effective control of the high energy beam and excitation mode. Finally, the in situ reduction and control of local residual stress distribution in mechanical components in service is realized. Thus, the whole strength, anti-fatigue and corrosion resistance of mechanical components in service are improved, and the service life, safety and reliability of components are also enhanced. This technology now is used in testing and regulation of oil and gas pipeline welding residual stress.

**Keywords** residual stress; ultrasonic; nondestructive testing; in situ regulation

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.040

(编辑 付娟娟)