

引文: 张玉龙, 侯荣国, 王瑞, 等. 基于超声相控阵技术的内壁腐蚀管道三维模型重构[J]. 油气储运, 2023, 42(12): 1369-1375.

ZHANG Yulong, HOU Rongguo, WANG Rui, et al. Three-dimensional model reconstruction of pipeline with inner wall corrosion based on ultrasonic phased array technology[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(12): 1369-1375.

# 基于超声相控阵技术的内壁腐蚀管道三维模型重构

张玉龙 侯荣国 王瑞 张苗苗 吕哲

山东理工大学机械工程学院

**摘要:** 管道内壁腐蚀存在隐蔽性强、不易及时监测等问题,为了直观展现内腐蚀管道形貌、缺陷的体积及空间分布情况,提出了基于超声相控阵技术的内壁腐蚀管道三维模型重构方法。采用自主搭建的采集平台,通过控制相控阵一维线阵探头,利用反射后的回波信号获取腐蚀管道内、外径空间坐标,再利用插值法构建内、外径间的点云数据集,并使用分层扫描方式得到各断层的点云数据;采用数据处理、逆向模型重构及正向建模等方式,对所采集的点云数据进行三维模型重构。将重构的三维模型与 Creaform 三维激光扫描仪获取的点云数据进行对比,结果表明:基于超声相控阵技术利用一维线阵探头获取点云数据具有可行性,且所建三维模型及缺陷的误差小、精准化程度高,对油气管道安全评估具有重要的参考价值。(图8,表3,参22)

**关键词:** 油气管道; 内壁腐蚀; 超声相控阵; 一维线阵; 点云数据; 缺陷精准化

中图分类号: TH878; TE88

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)12-1369-07

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.12.006

## Three-dimensional model reconstruction of pipeline with inner wall corrosion based on ultrasonic phased array technology

ZHANG Yulong, HOU Rongguo, WANG Rui, ZHANG Miaomiao, LYU Zhe

Department of Industrial Engineering, ShanDong University of Technology

**Abstract:** The inner wall corrosion of pipelines is concealed and hard to monitor in time. In order to visualize the shape of the internally corroded pipeline, as well as the defect volume and its spatial distribution, a three-dimensional (3D) model reconstruction method based on the ultrasonic phased array technology was proposed for the internally corroded pipeline. A self-built acquisition platform was used to control the one-dimensional linear array probes for the phased array, and the reflected echo signal was used to obtain the space coordinates between the inner and outer diameters of the corroded pipeline. Then, the point cloud data set between the inner and outer diameters was constructed by the interpolation method, and the point cloud data of each fracture zone were obtained by the hierarchical scanning method. Besides, data processing, reverse model reconstruction and forward modeling were performed for the 3D model reconstruction of the collected point cloud data. Finally, the reconstructed 3D model was compared with the point cloud data obtained by the Creaform 3D laser scanner. The results show that it is feasible to obtain the point cloud data using one-dimensional linear array probes based on the ultrasonic phased array technology, and the established 3D model and defects have small errors and high precision, which has important reference value for the safety evaluation of oil and gas pipelines. (8 Figures, 3 Tables, 22 References)

**Key words:** oil and gas pipelines, inner wall corrosion, ultrasonic phased array, one-dimensional linear array, point cloud data, precision of defects

油气管道长时间置于海底或地下,不可避免会受到腐蚀,其中内壁腐蚀是长输管道运行过程中常见的损伤模式<sup>[1-2]</sup>。内壁腐蚀引发的管道泄漏不仅会造成巨大经济损失,而且还会造成灾难性事故<sup>[3]</sup>。同时,由于其具有极强的隐秘性,不易及时监测,给管道风险评

估造成了诸多困难。因此,利用腐蚀检测技术获取腐蚀管道的数据显得尤为重要<sup>[4]</sup>。

目前,内壁腐蚀管道检测主要采用内检测技术<sup>[5]</sup>,通过判断壁厚损失百分比评价管道的损伤程度,同时借助常规超声检测与射线检测进行复测<sup>[6]</sup>。但常规超

声检测结果直观性弱,且获得的缺陷特征为后期安全评估提供的信息量较少;射线检测采用双壁单影透照方式,其检测精准化程度不高。超声相控阵技术具有波束形成灵活、检测效率高以及缺陷检出能力强等优点<sup>[7-10]</sup>,已广泛应用于管道缺陷、航空发动机叶片以及复合材料等的检测之中<sup>[11-12]</sup>。Schickert等<sup>[13]</sup>基于二维矩阵探头,实现了混凝土内部缺陷的检测。周正干等<sup>[14]</sup>提出了使用二维矩阵探头进行扫查时的三维体数据采集方法与数据融合算法,并对含有平底孔缺陷的金属铝标样实现了三维成像。詹湘琳等<sup>[9]</sup>研究发现矩阵探头虽然有良好的三维成像效果,但与线阵探头相比,矩阵探头阵元数目多、检测过程较为复杂、检测系统成本高、不易于随身携带。张昊等<sup>[15]</sup>利用一维线阵,通过断层扫描及全矩阵捕获方法,采用改进后的全聚焦算法实现了缺陷的三维重构。叶晓同等<sup>[16]</sup>基于超声相控阵技术,利用一维阵列换能器获得水下船体表面点云数据,实现了对水下船体表面的三维成像,且具有较高的成像分辨率。为了直观展现内腐蚀管道形貌、缺陷的体积及空间分布情况,在此提出一种基于超声相控阵技术的内壁腐蚀管道点云数据获取方法,利用获取的点云数据构建内壁腐蚀管道的三维模型,实现腐蚀缺陷的精准化表征。

### 1 超声相控阵技术原理及点云数据获取方法

常规的超声检测方法对内壁腐蚀管道进行检测时,由于缺陷处的能量不集中,会造成缺检、漏检的情况。超声相控阵技术基于相控阵雷达技术,使用多个独立可发射超声波束的阵元晶片,通过电子技术控制激发阵元晶片的数量与延时时间,可实现对超声波束聚焦位置与偏转方向的控制<sup>[17-18]</sup>。

利用超声相控阵技术对内壁腐蚀管道进行检测时,一维线阵探头置于管道外壁且与之垂直,沿表面向内发射超声波(图1,其中 $T$ 为时间, $W$ 为声波的波束值)。探头发射的超声波第一次经管道内壁反射并被探头接收,产生一次界面反射波a;该超声波第二次经管道内壁反射并被探头接收,产生二次界面反射波b;依次类推形成三次回波c、四次回波d等。利用触碰到管道内、外壁反射波的时间差可计算管道壁厚值,从而检测到腐蚀缺陷所在位置。

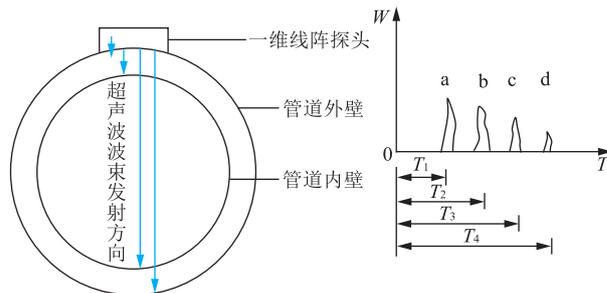


图1 腐蚀管道超声相控阵检测方法示意图  
Fig. 1 Ultrasonic phased array testing method for corroded pipelines

探头在扫描过程中将获得4个时间数据 $T_1 \sim T_4$ ,其中 $T_1$ 、 $T_4$ 分别表示超声波两次探测至管道外壁折回的时间, $T_2$ 、 $T_3$ 分别表示超声波两次探测至管道内壁折回的时间。假定管道外壁未受到腐蚀,根据超声波折回时间即可得到管道内径,其计算式为:

$$R_1 = R_E - t \tag{1}$$

$$t = [(T_2 - T_1) / 2]v \tag{2}$$

式中: $R_1$ 、 $R_E$ 分别为管道内径、外径,mm; $t$ 为管道壁厚,mm; $v$ 为超声波在管道内传播的速度,m/s。

采用编码器携带相控阵一维线阵探头,沿管道外壁旋转的方式获得腐蚀管道各部位的壁厚,根据旋转角度及获得的壁厚,可计算得到管道内壁与外壁上各离散点的空间坐标。

管道内壁上各点的空间坐标可表示为:

$$\begin{cases} x_1 = R_1 \sin(N\theta) \\ y_1 = R_1 \cos(N\theta) \end{cases} \tag{3}$$

管道外壁上各点的空间坐标可表示为:

$$\begin{cases} x_E = R_E \sin(N\theta) \\ y_E = R_E \cos(N\theta) \end{cases} \tag{4}$$

式中: $x_1$ 、 $y_1$ 分别为内壁上点的横、纵坐标值; $x_E$ 、 $y_E$ 分别为外壁上点的横、纵坐标值; $N$ 为探头中阵元的个数,其取值由探头阵元数目决定。

得到腐蚀管道内、外壁的空间坐标后,利用插值法构造两壁之间的点云数据集,其表达式为:

$$\begin{cases} x_i = (x_1 + x_E) / 2 \\ y_i = (y_1 + y_E) / 2 \end{cases} \quad (1 \leq i \leq n) \tag{5}$$

式中: $x_i$ 、 $y_i$ 分别为所构造的两壁之间点云数据的横、纵坐标值; $i$ 为分层扫描的断层数; $n$ 为断层总数。

由于采用的探头为一维线阵,只能得到二维平面点的空间坐标。为了实现三维模型的重构和内壁腐蚀缺陷的精准化表征,需要获得管道多个断层的回波数据。获取多个断层的方式即为分层扫描技术,其扫描

过程(图 2)为:以管道中心  $O$  作为坐标系原点,  $XOY$  平面构成一个断层,将  $Z$  轴作为机械移动轴,在扫描完一个平面后,移动编码器使探头在  $Z$  轴方向上移动,所移动的步进值即为  $z$  点的坐标值;将各断层所得到的坐标点数据融合,即可完成对内壁腐蚀管道点云数据的获取。

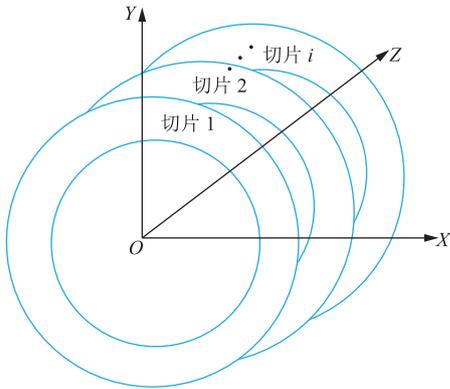


图 2 腐蚀管道多个断层的回波数据分层扫描方式示意图  
Fig. 2 Layered scanning method for echo data of multiple fracture zones in a corroded pipeline

## 2 腐蚀管道点云数据采集

### 2.1 采集平台及试样制作

为了验证上述内壁腐蚀管道点云数据获取方法的可行性与准确性,搭建了数据采集平台(图 3)。该平台由 OLYMPUS OmniScan SX 相控阵检测仪、内壁含缺陷的腐蚀管道、管道支架、编码器以及相控阵一维线阵探头组成,其中腐蚀管道外径为 152 mm、长度为 250 mm。为了更清晰、快速地得到腐蚀缺陷,采用电火花加工的方式在管道内壁加工 I~IV 共 4 个不同长度、宽度及深度的缺陷(表 1)。

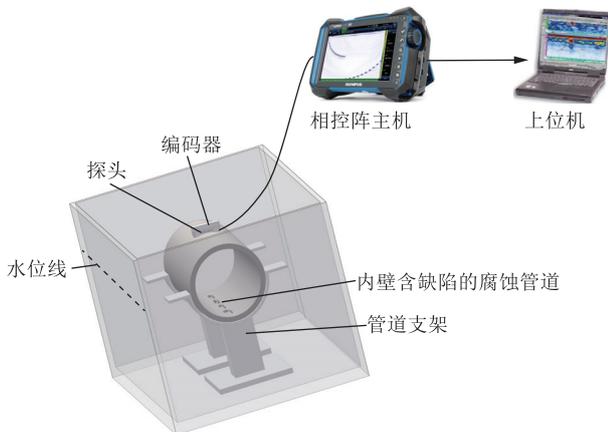


图 3 腐蚀管道内壁缺陷数据采集平台组成示意图  
Fig. 3 Composition of inner wall defect data acquisition platform for corroded pipelines

表 1 腐蚀管道内壁缺陷参数表

Table 1 Defect parameters for inner wall of corroded pipelines

缺陷编号	长度/mm	宽度/mm	深度/mm
I	35	10	4
II	35	10	6
III	40	10	4
IV	40	15	4

### 2.2 采集方法

将腐蚀管道置于管道支架上,两部分作为一个整体浸没于质量分数为 3.5% 的 NaCl 水溶液中,将其置于室温中,静置 48 h。将探头安装在编码器中,一侧与编码器型腔贴合,另一侧与管道外壁相互贴合。探头将接收的信号传输至上位机中,探头发射频率为 5 MHz、阵元数目为 64、阵元中心间距为 0.6 mm 以及阵元宽度为 0.5 mm。设定探头发射纵波声速为 5 900 m/s,通过相控阵检测仪发出激励信号,控制探头阵列中各阵元产生的超声波。驱动编码器沿管道轴线方向移动,实现内壁腐蚀管道点云数据的获取。

设定编码器在  $Z$  方向的步进值为 1 mm,将长度为 250 mm 的管道分为 250 个断层,并由编码器记录其  $Z$  方向坐标,完成腐蚀管道的点云数据采集(图 4)。

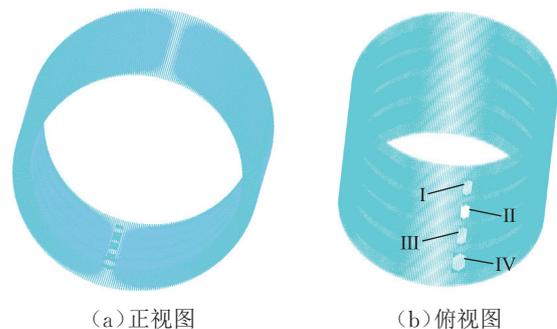


图 4 腐蚀管道原始点云数据采集图  
Fig. 4 Original point cloud data acquisition of corroded pipelines

## 3 腐蚀管道三维模型重构

由获取到的腐蚀管道原始点云数据(图 4)可见,4 个缺陷的具体形貌特征明显,且点云间分布较为规则,杂乱点较少,但点云之间缺乏位置关系,且密度较大。这表明建模时对于计算机要求较高,将导致模型建立速度较慢,故有必要对点云数据做进一步处理<sup>[19]</sup>。

### 3.1 数据处理

#### 3.1.1 点云拓扑关系建立

采用超声相控阵所采集到的点云数据之间无任何位置关系,对其进行去噪及精简时较为困难,故采用K-d树法<sup>[20]</sup>进行空间划分,对K最近邻域进行搜索,建立点云间的拓扑关系<sup>[21]</sup>。其具体步骤为:过点云中所有X坐标的均值作平行于YOZ平面的分割面;然后,在分割后的两部分空间内过Y坐标的均值作平行于XOZ平面的分割面;最后,基于分割后的子空间过Z坐标的均值作平行于XOY的平面;重复上述过程直至将整个空间分割完成,最终建立离散点云间的拓扑关系。

#### 3.1.2 点云去噪

对腐蚀管道进行数据采集的过程中,由于仪器本身及被测目标表面的原因,会造成点云数据中噪声点的生成,需要通过去噪将其删除<sup>[22]</sup>。对于较为明显的噪声点,采用手工删除的方式进行剔除;对于大尺度噪声,采用半径滤波的方式进行去噪;对于点云数据中产生的小振幅噪声,采用高斯滤波方法进行删除。

#### 3.1.3 点云精简

过大密度的点云数据会影响模型重构的效率,同时增加计算机处理时间。点云精简的目的是采用少量具有模型特征点云数据重构出高精度的原始模型,即利用体素栅格滤波进行原始点云数据的精简,精简后的点云数据可最大限度体现原始模型的几何特征。

### 3.2 逆向模型重构

将处理后的点云数据导入Geomagic Studio软件,对其进行点处理、多边形处理以及NURBS(Non-Uniform Rational B-Splines)曲面重建。

(1)点处理阶段。由于点云数据缺乏RGB(Red Green Blue)信息,需对其进行着色处理,使其更能体现腐蚀管道的特征形状,再对其进行封装操作,得到多边形模型。

(2)多边形处理阶段。采用搭桥方式,对封装后产生的孔洞进行填补;运用去除特征命令,对不平滑区域进行处理;采用删除钉状物删除尖角,并通过松弛操作对多边形做整体的平滑。

(3)NURBS曲面重建阶段。对多边形进行探测轮廓线的绘制(图5a);随后以轮廓线为边界,采用自动

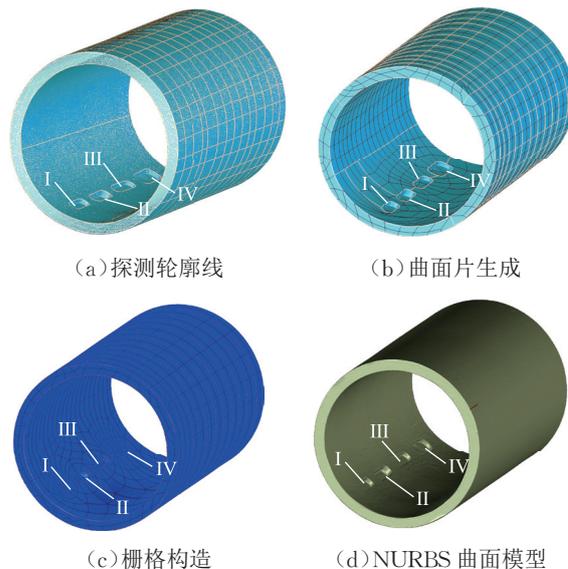


图5 腐蚀管道NURBS曲面重建阶段模型图  
Fig. 5 NURBS curved surface reconstruction model of corroded pipelines

生成面片的方式,生成曲面片(图5b);再以生成的面片为基础,构造得到栅格(图5c);最后以非均匀有理B样条为基础,拟合得到NURBS曲面(图5d)。

### 3.3 正向建模

将NURBS曲面模型导入建模软件UG(Unigraphics NX)中,赋予生成的NURBS曲面模型相应的材质并对其进行渲染,使其更加符合真实管道的三维形貌(图6)。

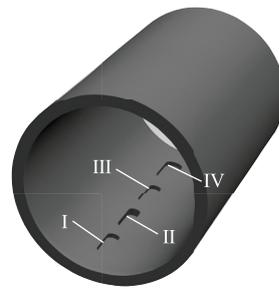


图6 渲染后的腐蚀管道模型图  
Fig. 6 Corroded pipeline model after rendering

## 4 三维模型及缺陷精准化分析

为了验证所建模型的精度,对腐蚀管道三维模型及缺陷进行精准化分析。采用Creaform三维激光扫描仪对上述腐蚀管道及其内壁加工的4个缺陷进行扫描(图7)。

将三维激光扫描仪获取的点云数据与重构的三维模型导入Geomagic Studio软件中,对二者进行偏差分析(图8),可见其最大正误差为0.4719 mm,最大负误

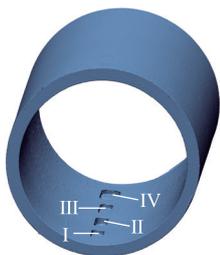


图7 三维激光扫描仪获得的腐蚀管道点云数据图  
Fig. 7 Point cloud data of corroded pipelines obtained by 3D laser scanner

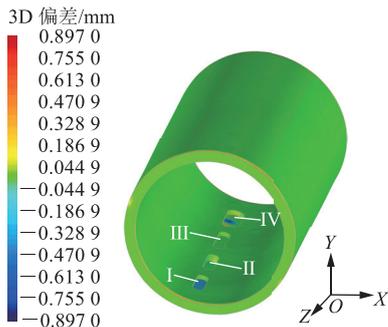


图8 三维激光扫描仪获取的腐蚀管道点云数据与新建三维模型之间的偏差分析图  
Fig. 8 Analysis on deviation between the point cloud data of corroded pipelines obtained by 3D laser scanner and the new 3D

差为-0.504 3 mm。所构建的内壁腐蚀管道三维模型误差在 0.5 mm 左右、平均误差在 0.01 mm 左右,误差较小,且主要误差分布在缺陷处。经过多次扫描分析,得出其原因为:管道内壁处的采光性能差,导致缺陷处采集的数据不够完整,进而使得 Creaform 三维激光扫描仪获取的点云数据与三维模型的比对出现较大误差。为避免误差带来的不利影响,在三维激光扫描过程中获取 A 扫、C 扫图像作为辅助,通过多种评估方式提高三维模型的准确性能。

为了进一步验证所建模型的精准程度,采用 Solidworks 软件对模型中缺陷的长度、宽度及深度进行测量(表 2),并与表 1 中的实验加工缺陷尺寸进行对比(表 3),可见,其长度、宽度、深度最大误差分别为 1.30%、2.40%、2.00%。这表明基于超声相控阵技术利用一维线阵探头获取点云数据的方法是可行的,且所建三维模型及缺陷的精准化程度高。

表 2 利用 Solidworks 软件所得的 4 个缺陷三维测量结果表  
Table 2 3D measurements of four defects using Solidworks software

缺陷编号	长度/mm	宽度/mm	深度/mm
I	34.74	10.17	4.06
II	34.76	10.24	6.09
III	40.52	10.08	4.05
IV	39.78	15.26	4.08

表 3 4 个缺陷实验加工值与三维测量值误差统计表  
Table 3 Error statistics of the experimental processing values and the 3D measurements of four defects

缺陷编号	误差		
	长度	宽度	深度
I	0.74%	1.70%	1.50%
II	0.69%	2.40%	1.50%
III	1.30%	0.80%	1.25%
IV	0.55%	1.73%	2.00%

## 5 结论

针对油气输送管道内壁腐蚀隐蔽性强、不易及时监测等问题,基于超声相控阵技术,提出了一种利用一维线阵探头获取内壁腐蚀管道点云数据的方法,并利用自主搭建的采集平台,研究利用该方法获取的点云数据对内壁腐蚀管道三维模型重构及缺陷表征的可行性与精准化程度。新建模型误差小,精准化程度高,可直观展现出管道形貌、内壁缺陷的体积大小及空间分布情况。

为了验证所提出方法的可行性及后期在模型构建中可较为清晰地得到缺陷的特征,所构建的内壁缺陷尺寸大且较为完整,今后可进一步丰富缺陷类型(如尺寸较小或不规则的缺陷),提高模型的适用性。

## 参考文献:

[1] 孙明明,方宏远,赵海盛,李昕. 不规则缺陷管道失效压力影响因素及评价方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2022, 46(4): 152-159. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2022.04.019.  
SUN M M, FANG H Y, ZHAO H S, LI X. Influence factors and evaluation method on failure pressure of pipelines with irregular-shaped defects[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(4): 152-159.

[2] 寿乐勇. 天然气长输管道内腐蚀原因分析及控制措施[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(16): 31-32. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4076.2020.16.016.  
SHOU L Y. Cause analysis and control measures of corrosion in long distance natural gas pipeline[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2020, 40(16): 31-32.

[3] 王子东,肖志刚. 在役含缺陷油气管道的安全评价准则[J]. 油气储运, 2013, 32(6): 587-589. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2013.06.004.  
WANG Y D, XIAO Z G. Safety evaluation standards for in-service oil and gas pipelines with defects[J]. Oil & Gas Storage

- and Transportation, 2013, 32(6): 587-589.
- [4] 盛沙, 戴波, 谢祖荣. 管道超声内检测三维成像技术研究[J]. 北京石油化学工业学报, 2012, 20(1): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1008-2565.2012.01.001.
- SHENG S, DAI B, XIE Z R. A study on the three-dimensional imaging technology for pipeline ultrasonic in-line inspection[J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2012, 20(1): 1-5.
- [5] 谢飞, 李佳航, 王新强, 马成, 苏禹铭, 孙小晴. 天然气管道 CO<sub>2</sub> 腐蚀机理及预测模型研究进展[J]. 天然气工业, 2021, 41(10): 109-118. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.10.012.
- XIE F, LI J H, WANG X Q, MA C, SU Y M, SUN X Q. Research progress on CO<sub>2</sub> corrosion mechanism and prediction model of natural gas pipelines[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(10): 109-118.
- [6] 江雁山, 邓进, 李喆, 刘礼良. 长输管道内壁腐蚀缺陷的超声波衍射时差法检测[J]. 无损检测, 2021, 43(7): 57-59, 78. DOI: 10.11973/wsyc202107013.
- JIANG Y S, DENG J, LI Z, LIU L L. Ultrasonic TOFD testing of corrosion defects on the inner wall of long-distance pipelines[J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(7): 57-59, 78.
- [7] 靳世久, 杨晓霞, 陈世利, 黄玉秋, 郭薇. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 925-934. DOI: 10.13382/j.jemi.2014.09.001.
- JIN S J, YANG X X, CHEN S L, HUANG Y Q, GUO W. Development and application of ultrasonic phased array inspection technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(9): 925-934.
- [8] DRINKWATER B W, WILCOX P D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: a review[J]. NDT & E International, 2006, 39(7): 525-541. DOI: 10.1016/j.ndteint.2006.03.006.
- [9] 李玉坤, 于文广, 李玉星, 张玉, 陶建中, 程磊. 超声临界折射纵波测量应力的温度影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 134-140. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2021.02.016.
- LI Y K, YU W G, LI Y X, ZHANG Y, TAO J Z, CHENG L. Effect of temperature on measurement of stress by ultrasonic critical refractive longitudinal wave[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(2): 134-140.
- [10] 杨晓霞, 薛彬, 靳世久, 贾乐成, 张昊. 压缩传感在超声相控阵检测系统中的应用研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1286-1294. DOI: 10.13382/j.jemi.2015.09.005.
- YANG X X, XUE B, JIN S J, JIA L C, ZHANG H. Application study on compressed sensing in ultrasonic phased array detection system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9): 1286-1294.
- [11] 赵湘阳, 曹学文, 曹恒广, 张磐, 雷毅. 超声回波法海底管道外涂层检测技术[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 162-169. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2022.05.018.
- ZHAO X Y, CAO X W, CAO H G, ZHANG P, LEI Y. Detection technology for submarine pipeline's outer coating based on ultrasonic echo method[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(5): 162-169.
- [12] XIE Q, TAO J H, WANG Y Q, GENG J H, CHENG S Y, LÜ F C. Use of ultrasonic array method for positioning multiple partial discharge sources in transformer oil[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(8): 084705. DOI: 10.1063/1.4892464.
- [13] SCHICKERT M. Three-dimensional ultrasonic imaging of concrete elements using different SAFT data acquisition and processing schemes[J]. AIP Conference Proceedings, 2015, 1650(1): 104-113. DOI: 10.1063/1.4914599.
- [14] 周正干, 李洋, 陈芳浩, 周文彬. 矩阵换能器超声三维成像方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 371-378. DOI: 10.3969/j.issn.0254-3087.2016.02.018.
- ZHOU Z G, LI Y, CHEN F H, ZHOU W B. Research on three dimensional imaging method using ultrasonic matrix array transducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 371-378.
- [15] 张昊, 陈世利, 贾乐成. 基于超声相控线阵的缺陷全聚焦三维成像[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7): 992-999. DOI: 10.13382/j.jemi.2016.07.002.
- ZHANG H, CHEN S L, JIA L C. Three-dimensional total-focus imaging based on ultrasonic linear phased array[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(7): 992-999.
- [16] 叶晓同, 赵鹏, 郑珂, 王月兵, 郑慧峰. 基于超声相控阵的水下船体表面成像方法研究[J]. 计量学报, 2020, 41(1): 79-84. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1158.2020.01.15.
- YE X T, ZHAO P, ZHENG K, WANG Y B, ZHENG H F. Research on underwater hull surface imaging method based on ultrasonic phased array[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(1): 79-84.
- [17] 李一轩, 汪小凯, 董新宇, 关山月. 轮毂轴承滚道成形缺陷超声相控阵检测技术[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(11): 61-66. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2022.11.008.

- LI Y X, WANG X K, DONG X Y, GUAN S Y. Ultrasonic phased array detection technology of forming defects of wheel hub bearing raceway[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(11): 61-66.
- [18] 曹燕亮, 云维锐. 超声相控阵多聚焦技术在奥氏体不锈钢检测中的应用[J]. 无损探伤, 2022, 46(6): 43-45. DOI: 10.13689/j.cnki.cn21-1230/th.2022.06.008.
- CAO Y L, YUN W R. Application of ultrasonic phased array multi focus technique in austenitic stainless steel testing[J]. Nondestructive Testing Technology, 2022, 46(6): 43-45.
- [19] 梁国安, 姚叶子, 郑凯, 许倩, 王海龙, 王海涛. 基于超声相控阵的角焊缝缺陷信号重构方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(3): 222-228. DOI: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2022.03.037.
- LIANG G A, YAO Y Z, ZHENG K, XU Q, WANG H L, WANG H T. Research on reconstruction method of fillet weld defect signal based on ultrasonic phased array[J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(3): 222-228.
- [20] 王鑫龙, 孙文磊, 张建杰, 黄勇, 黄海博. 基于点云数据的逆向工程技术研究综述[J]. 制造技术与机床, 2018(2): 49-53. DOI: 10.19287/j.cnki.1005-2402.2018.02.010.
- WANG X L, SUN W L, ZHANG J J, HUANG Y, HUANG H B. Review on reverse engineering research based on point cloud data[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(2): 49-53.
- [21] 杨正世. 三维点云数据处理关键技术的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- YANG Z S. Research on key technology of 3D point cloud data processing[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [22] 彭娉, 陈时健, 任利杰, 于新海, 陈尚书, 李锦. 三偏心蝶阀密封面在位测量的点云数据处理方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 30-38. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108479.
- PENG P, CHEN S J, REN L J, YU X H, CHEN S S. A point cloud data processing method for in-position measurement of sealing surface of triple eccentric butterfly valves[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 30-38.
- (收稿日期: 2022-11-11; 修回日期: 2023-02-01; 编辑: 李在蓉)
- 
- 基金项目:** 山东省自然科学基金资助项目“声液耦合微细磨料水射流流体力学特性及其加工性能研究”, ZR2020ME154.
- 作者简介:** 张玉龙, 男, 1997年生, 在读硕士生, 2020年毕业于青岛农业大学海都学院机械设计制造及其自动化专业, 现主要从事水下内壁腐蚀管道检测、防护及图像处理的研究工作。地址: 山东省淄博市张店区新村西路266号, 255000。电话: 19819708184。Email: 1263137541@qq.com
- 通信作者:** 侯荣国, 男, 1979年生, 教授, 2015年博士毕业于山东大学机械制造专业, 现主要从事管道腐蚀与防护、超声无损检测的研究工作。地址: 山东省淄博市张店区新村西路266号, 255000。电话: 13053387019。Email: hourongguo212@163.com

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



(上接第 1368 页)

- DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.034.
- [27] MIKIELEWICZ D, WAJS J. Performance of the very high-temperature heat pump with low GWP working fluids[J]. Energy, 2019, 182: 460-470. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.203.
- [28] 俞红梅, 衣宝廉. 电解制氢与氢储能[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 58-65. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2018.03.009.
- YU H M, YI B L. Hydrogen for energy storage and hydrogen production from electrolysis[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(3): 58-65.
- [29] Anon. Cummins, discover cummins electrolyzer technologies[EB/OL]. (2023-01-01)[2023-05-09]. https://www.cummins.com/new-power/applications/about-hydrogen.
- (收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-05-24; 编辑: 刘朝阳)
- 基金项目:** 陕西省重点研发计划项目“煤梯级利用兰炭生产新技术与装置”, 2021GXLH-Z-088.
- 作者简介:** 宋虎潮, 男, 1998年生, 在读博士生, 2020年毕业于中南大学新能源科学与工程专业, 现主要从事动力工程及工程热物理专业方向的研究工作。地址: 陕西省西安市(长安区)西安交通大学创新港校区, 710041。电话: 13572802083。Email: 986278776@qq.com
- 通信作者:** 刘银河, 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 2005年博士毕业于西安交通大学热能工程专业, 现主要从事热能工程相关研究。地址: 陕西省西安市咸宁西路28号, 710049。电话: 029-82664971。Email: yinheliu@mail.xjtu.edu.cn

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

