◀石油管工程▶

油气管道CRC型焊缝超声相控阵分层聚焦检测方法研究*

姚 欢[1] 唐 锴[2,3] 韩志雄[4] 李亨涛[1] 陈磊磊[1]

（1. 中国石油集团工程材料研究院有限公司 2. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室
3. 武汉理工大学汽车零部件技术湖北省协同创新中心 4. 武汉中科创新技术股份有限公司）

姚欢，唐锴，韩志雄，等. 油气管道CRC型焊缝超声相控阵分层聚焦检测方法研究［J］. 石油机械，2026，54（9）：126-134.

Yao Huan，Tang Kai，Han Zhixiong，et al. Ultrasonic phased array layered focusing detection method for CRC-type welds in oil and gas pipelines［J］. China Petroleum Machinery，2026，54（9）：126-134.

摘要：常规超声检测油气管道焊缝时，存在扫查器结构较大、现场设备安装与校准困难等问题。为此，提出一种基于超声相控阵分层聚焦原理的CRC型管道焊缝检测方法。以CRC型管道焊缝为研究对象，根据其坡口形貌与结构特点将其划分为12个深度层级。设计超声相控阵分层聚焦法则与检测工艺，分别计算各层级的延迟时间并选择特定的相邻阵元激发聚焦声束。在此基础上，建立包含未熔合、气孔等典型缺陷的超声相控阵检测有限元二维瞬态仿真模型，获取单次偏转聚焦过程的A扫信号，并开展了超声相控阵分层聚焦扫查对比试验。试验结果表明：模型在第5层、第10层坡口未熔合及第12层根焊气孔缺陷处，其回波信号的最大幅值均可达到激励始波幅值的40%左右，验证了分层聚焦检测工艺的可行性；分层聚焦检测技术对焊缝展现出良好的逐层分析能力，与常规TOFD检测相比，缺陷自身高度的测量相对误差控制在8%以内。研究结果可为油气管道焊缝超声相控阵检测提供技术支持。

关键词：油气管道；CRC型管道焊缝；分层聚焦检测；超声相控阵；有限元仿真

中图分类号：TE973 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202510038

Ultrasonic Phased Array Layered Focusing Detection Method for CRC-Type Welds in Oil and Gas Pipelines

Yao Huan[1] Tang Kai[2,3] Han Zhixiong[4] Li Hengtao[1] Chen Leilei[1]

（1. *CNPC Tubular Goods Research Institute*；2. *Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components*，*Wuhan University of Technology*；3. *Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology*，*Wuhan University of Technology*；4. *Wuhan Zhongke Innovation Technology Co.*，*Ltd.*）

Abstract：Conventional ultrasonic detection of oil and gas pipeline welds is deficient for bulky scanner structures and difficult on-site installation and calibration. This paper proposes a detection method for CRC-type pipeline welds based on the principle of ultrasonic phased array layered focusing. By groove morphology and structural characteristics，the CRC-type pipeline welds are divided into 12 depth layers. The ultrasonic phased array layered focusing laws and detection process were designed，the delay time for each layer was calculated，and specific adjacent array elements were selected to excite the focused acoustic beams. On this basis，a finite element two-

* 基金项目：陕西省青年基金项目“基于弱磁检测的埋地油气钢管损伤非开挖诊断方法研究”（2024JC-YBQN-0545）；武汉市东湖新技术开发区“揭榜挂帅”项目“基于AI深度学习的超声相控阵智能检测与评价关键技术研发及应用”（2022KJB128）。

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

dimensional transient simulation model for ultrasonic phased array detection containing typical defects such as lack of fusion and pores was established to obtain the A-scan signal during the single deflection focusing process. Furthermore, ultrasonic phased array layered focusing scanning comparative experiments were performed. The experimental results show that, at the lack-of-fusion defects in the 5th and 10th layers and the root-pass pore defect in the 12th layer, the maximum amplitude of the echo signal can reach about 40% of that of the excitation initial wave, verifying the feasibility of the layered focusing detection technique. The layered focusing detection technique exhibits good layer-by-layer analysis capability for welds. Compared with conventional TOFD detection, it measures the defect height with a relative error controlled below 8%. The research provides technical support for ultrasonic phased array detection of welds in oil and gas pipelines.

Keywords: oil and gas pipeline; CRC-type pipeline weld; layered focusing detection; ultrasonic phased array; finite element simulation

0　引　言

随着能源需求的持续上升，国内长输管道进入全面建设阶段[1-3]。由于油气介质易燃易爆，管道破损导致的泄漏易引发资源损耗与环境污染，造成严重的工程安全隐患[4]。对此，管道焊缝作为油气管道系统的薄弱部位，其焊接质量对于保障管道安全运营至关重要，而管道焊缝缺陷是较为常见的危害形式之一[5]。近年来，因环焊缝缺陷引起的管道失效事故频发[6]，相关标准规定了油气长输管道主干段部位的焊缝应进行100%无损检测[7]。

针对管道腐蚀周期优化等各项内检测前沿技术，学者们开展了大量评估与研究工作[8-11]。目前管道焊缝内部缺陷的检测手段主要为常规超声检测和射线检测。射线检测虽然结果直观，但检测速度慢、成本高，且存在辐射。常规超声在检测较大厚度管道过程中，焊缝区域粗大晶粒组织及其结构各向异性会导致声束扩散和畸变严重，穿透能力不足，易造成微小缺陷判定困难[12]。而且为了确保对整个焊缝一次性检测，需要通过串列法使用多个探头以保证焊缝全厚度方向上的整体覆盖，即多探头系统。另外，每个分层需要由不同角度和不同聚焦深度的探头来覆盖，以及通过移动探头位置来改变声程和扫查位置，这就需要设计大型探头夹具和扫查机构，且每个探头需要一个常规超声通道，使得常规超声检测仪器和扫查器结构偏大，导致检测设备安装、校准和扫查不方便[13]。为解决常规超声检测的局限性，相控阵超声检测（PAUT）凭借其灵活的声束偏转与高分辨率成像优势，近年来已在承压设备特殊结构对接焊缝及长输管道环焊缝的内部缺陷检测中得到了有效应用与验证[14-15]。随着NB/T 47013.15—2021《承压设备无损检测 第15部分：相控阵超声检测》等标准的颁布与实施，该技术在工业管道无损检测中的可靠性得到了进一步验证，展现出检测分辨率高、灵敏度及信噪比良好的技术特点[16-19]。

CRC型焊缝作为长输管道自动焊接中广泛应用的一种典型复合窄间隙坡口焊缝，其热焊区、填充区及根焊区等精细划分，侧壁坡口面角度趋于陡峭（通常仅为5°左右）。这种特征导致侧壁未熔合等面积型缺陷的物理取向近乎垂直于管壁，常规超声或相控阵常规扇形扫查声束难以在全厚度范围内与侧壁坡口面保持最佳的垂直入射取向，极易因回波声束偏离换能器接收孔径而引发漏检。

为此，笔者提出了一种针对CRC型管道焊缝的超声相控阵分层聚焦检测方法。通过分析CRC型管道焊缝结构特点，设计了超声相控阵分层聚焦法则和检测工艺。具体为将焊缝分层后，针对每一层的焊缝单独计算出聚焦法则，并选择最合适的数个相邻阵元激发聚焦声束进行检测，通过对典型焊缝缺陷超声相控阵检测有限元仿真和试验，验证分层聚焦检测工艺的可行性；在探头固定位置下，通过动态声束分层聚焦实现对复杂结构CRC焊缝的全覆盖检测，有效区别于传统需要频繁移动多探头的常规扫查方案。研究结果可为油气管道焊缝超声相控阵检测提供技术支持。

1　焊缝超声相控阵分层聚焦法则

1.1　分层聚焦检测工艺设计

油气管道自动焊焊接过程中的主要缺陷类型有面积型缺陷（未熔合、裂纹）和体积型缺陷

（气孔、夹渣）。使用超声工艺设计仿真软件 Beamtool，针对图 1 所示的 CRC 型焊缝的不同分层进行检测工艺模拟。仿真中各参数取值如下：热焊区角度 α 为 45°，半坡口角 β 为 5°，根焊角度 θ 为 37.5°，填充区厚度 F 为 16.1 mm，焊缝厚度 H 为 21.4 mm，根焊区高度 R 为 1.7 mm，钝边高度 L_{cp} 为 1.3 mm。

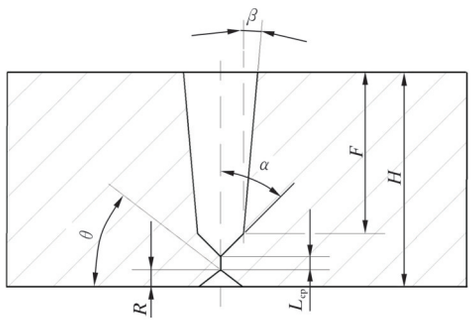


图 1　CRC 型焊缝结构示意图

Fig. 1　Structure of CRC-type weld

设焊缝厚度 H 被划分为 K 层，第 i 层空间位置处声强度为 I_i。定义第 i 层的归一化聚焦能量分布函数 $q_i(s)$ 为：

$$q_i(s)=\frac{I_i}{\int_{S_i} I_i \mathrm{d}s} \tag{1}$$

采用空间信息熵 H_i 来度量主瓣声束能量在空间上的离散程度，其计算公式为：

$$H_i=-\int_{S_i} q_i(s)\ln[q_i(s)]\mathrm{d}s \tag{2}$$

采用能量集中度指标 C_i 来反映声束能量在核心区域的聚集紧凑性，其定义为：

$$C_i=\frac{\int_{S_i} I_i^2 \mathrm{d}s}{\left(\int_{S_i} I_i \mathrm{d}s\right)^2} \tag{3}$$

为了协同优化深度分层区间，引入阵元相位误差方差，构建如下分层结构综合代价函数 J：

$$J=\lambda_1\sum_{i=1}^{K}H_i+\lambda_2\sum_{i=1}^{K}\frac{1}{C_i}+\lambda_3\sum_{i=1}^{K}\sigma_i^2 \tag{4}$$

式中：σ_i^2 为第 i 层孔径内的相位误差；λ_1、λ_2、λ_3 为权重系数，最优分层取使 J 最小的 K；s 为焊缝对应层级的空间位置，m；S_i 为 i 层声束覆盖焊缝区域的空间积分域，无量纲。

其中空间信息熵用于度量主瓣能量离散程度，能量集中度指标反映能量集中性。

在 Beamtool 软件中对焊缝缺陷进行检测工艺设计，经过上述计算后将 CRC 型焊缝划分为 12 层，并对不同层选择对应的激发晶片，设置不同的延时法则，以实现焊缝区域的全覆盖检测。检测工艺设计结果如图 2 所示，其中第 5、10、12 层检测阵元设计见表 1。

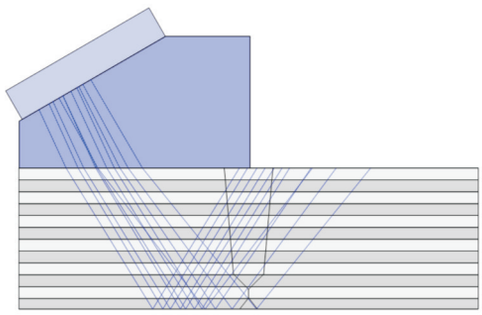


图 2　分层工艺模拟结果

Fig. 2　Layering process simulation

表 1　分层检测阵元

Table 1　Layered detection array elements

检测目标层	激发阵元	接收阵元
5	1~16	42~57
10	11~26	27~42
12	18~33	18~33

1.2　分层聚焦延迟法则计算

假设相控阵探头阵列孔径为 N，阵元间距为 p，每次激发阵元序号为 n。根据速度时间路程之间的关系，可以求出每个孔径中阵元的声波传播时间 t_n：

$$t_n=\frac{l}{c} \tag{5}$$

式中：c 为工件中的纵波声速，m/s；l 为孔径内阵元声束的传播距离，m。

最后根据所有阵元的声波传播时间求得每个阵元的延迟时间 τ_n：

$$\tau_n=\max(t_n)-t_n \tag{6}$$

对于多层介质的工作情况，每个阵元延迟时间的计算还要分别求出其声波在第一介质内传播时间 t_1 与第二介质内的传播时间 t_2，最后求和。

以阵列孔径中晶片的下表面为 x 轴，阵列孔径的对称轴为 y 轴，阵列孔径的中心点 O（与 A 重合）为原点建立坐标系（见图 3）。设第一介质的纵波声速为 c_1，激发阵元中心到母材上表面的距离为 h，楔块角度为 ψ，聚焦点为 $C(x_C,\ y_C)$；设声波在入射面上的入射点为 $B(x_B,\ y_B)$，可以求得入射面函数为：

$$f(x)_1=-x\tan\varphi+h/\cos\varphi \tag{7}$$

则 B 点的纵坐标为：

$$\begin{cases} x_B \\ y_B=-x_B\tan\varphi+h/\cos\varphi \end{cases} \tag{8}$$

设声波在母材底面上的反射点为$D(x_D,\ y_D)$，可以求得母材底面函数为：

$$f(x)_2 = -x\tan\varphi + (H+h)/\cos\varphi \tag{9}$$

然后可以求得C点关于底面的对称点C'（$x_{C'}$，$y_{C'}$）。根据图3可以看出，声波的传播路径由楔块中的l_{AB}和母材中的l_{BD}与l_{CD}组成，计算如下：

$$l_{AB} = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2} \tag{10}$$

$$l_{BD} + l_{CD} = \sqrt{(x_{C'} - x_B)^2 + (y_{C'} - y_B)^2} \tag{11}$$

已知第一介质纵波声速为c_1，第二介质纵波声速为c_2，据此可以求得CRC型焊缝相控阵中任意阵元的超声波传播时间为：

$$t_n = \frac{\sqrt{\left(\frac{2n-N-1}{2}p - x_B\right)^2 + y_B{}^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{(x_{C'} - x_B)^2 + (y_{C'} - y_B)^2}}{c_2} \tag{12}$$

根据费马原理可知，超声波在多介质中按最短时间传播，即传播时间t_n关于x_B的导函数为0：

$$\frac{\mathrm{d}t_n}{\mathrm{d}x_B} = 0 \tag{13}$$

求得B点横坐标后，即可得到任意阵元的声束路径$\overrightarrow{AB}$、$\overrightarrow{BD}$与$\overrightarrow{DC}$。再根据公式（12）可求得各阵元的延迟时间τ_n。

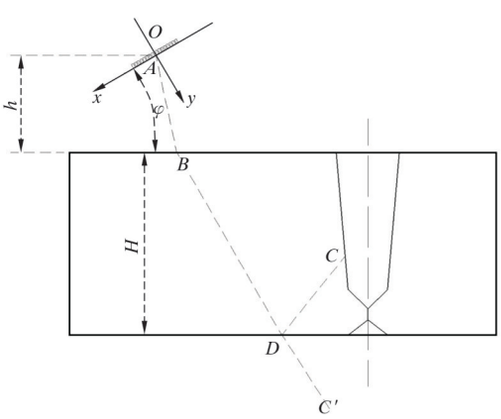


图3　CRC焊缝相控阵延迟法则计算原理图

Fig. 3　Schematic diagram of CRC-type weld phased array delay law calculation

按照上述的分层检测阵元设计方法和聚焦法则计算方法，对第5、10、12层相控阵聚焦算法进行仿真。以第5层检测为例，激发阵元为1~16号阵元，接收阵元为42~57号阵元。分别将第5、10、12层的阵元延迟时间计算出来，在MATLAB中绘制出各层阵元与延时的柱状图和各层对应的声束聚焦传播路径图，如图4所示。图4中黄色直线为以激发阵元中心为原点时分界面方程，蓝色直线为底面方程。

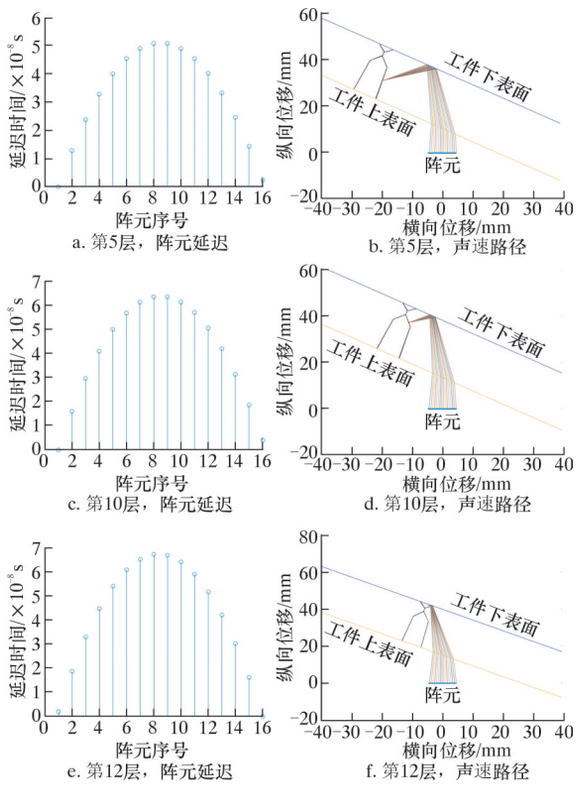


图4　分层聚焦延迟时间及声束聚焦路径模拟

Fig. 4　Simulation of layered focusing delay time and acoustic beam focusing paths

2　焊缝超声相控阵分层聚焦检测仿真

2.1　仿真模型

根据图4中的阵元参数，利用COMSOL软件对2种典型缺陷检测过程进行仿真，仿真模型如图5所示。其中阵元宽度设置为0.25 mm，阵元间隙设置为0.1 mm；试块厚度设置为21.4 mm，长度设置为70 mm；缺陷直径设置为2 mm。设置完美匹配层以吸收部分杂波。楔块材料设置为亚克力塑料，试块材料为高强度X80碳钢，缺陷位置材料设置为空气。材料参数如表2所示。

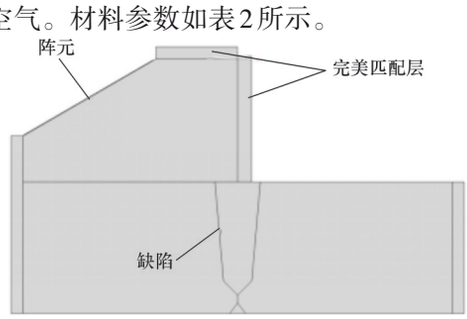


图5　仿真等效模型

Fig. 5　Simulation equivalent model

表 2　仿真材料参数

Table 2　Simulation material parameters

材料	传播声速/(m·s^{-1})	泊松比
亚克力塑料	2 600	0.35
X80碳钢	3 200	0.29

因为超声换能器、缺陷等都具有轴对称性质，所以声场分布也是轴对称的，可以将模型简化为二维。物理场选择为“压力声学，瞬态”，设置硬声场边界，压力等边界条件。楔块和母材选择自由三角形网格，网格尺寸为波长的⅙；完美匹配层选择映射网格划分，精度为极细化，激励脉冲设置为正弦脉冲。选择默认求解器，步长设置为 0.02 μs，即可开始进行计算。

模型计算完毕，对仿真结果进行后处理。在结果栏中选择二维绘图组，分别绘制不同时刻下的声压云图。图 6 为第 5 层 2 mm 尺寸未融合缺陷的检出过程。其中色带表示声压强度，1~16 号阵元按照图 4a 延时分别激发。由图 6 可知：1.5 μs 时为阵元刚刚激发，声波合成后形成一定偏转角度的波面；6.5 μs 时为声波从楔块传进试块时发生了折射；17.3 μs 时声波经过底面反射后聚焦在第 5 层坡口处；19.0 μs 时出现明显的缺陷回波信号，然后被 42~57 号阵元接收。可以看出，分层聚焦方法在指定层缺陷处有着明显的缺陷回波反射，能够进行缺陷的检出。

图 7 和图 8 分别为模拟第 10 层 2 mm 未熔合缺陷和第 12 层 ø1 mm 气孔缺陷的检出过程。声波分别由 11~26 号阵元和 18~33 号阵元激发。由图 7 和图 8 可知，传播过程同第 5 层未熔合检测中类似，激发后经过折射进入工件，在缺陷表面反射后分别被 27~42 号阵元和 18~33 号阵元接收。

2.2　结果分析

各层仿真时，16 个探针的结果合成得到的分层聚焦检测仿真 A 扫信号如图 9 所示。

由图 9 可知，第 5 层缺陷回波幅值略高于第 10 层。这是因为第 5 层坡口角度较小时，缺陷表面反射回波可以直接被探针接收，而第 10 层坡口角度较大时，缺陷表面的反射回波方向偏向左下，还要经过一次底面反射再被接收，信号相对减弱。

第 5 层和第 10 层的坡口未熔合检测模式为一发一收模式，而第 12 层根焊区气孔缺陷检测模式为自发自收。一发一收模式下，声波在界面的反射回波会在楔块内部震荡并沿着楔块向上传播，

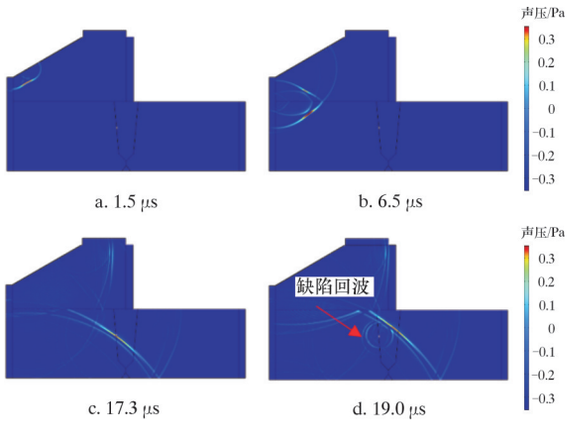


图 6　第 5 层未熔合缺陷检出过程

Fig. 6　Detection of lack-of-fusion defect in the 5th layer

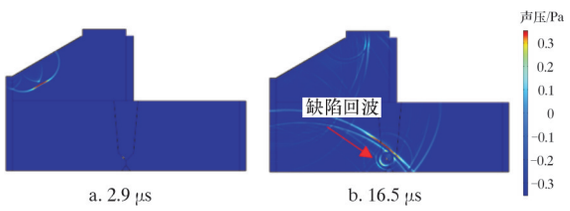


图 7　第 10 层未熔合缺陷检出过程

Fig. 7　Detection of u lack-of-fusion defect in the 10th layer

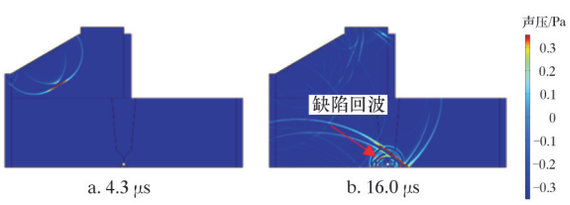


图 8　第 12 层气孔缺陷检出过程

Fig. 8　Detection of pore defect in the 12th layer

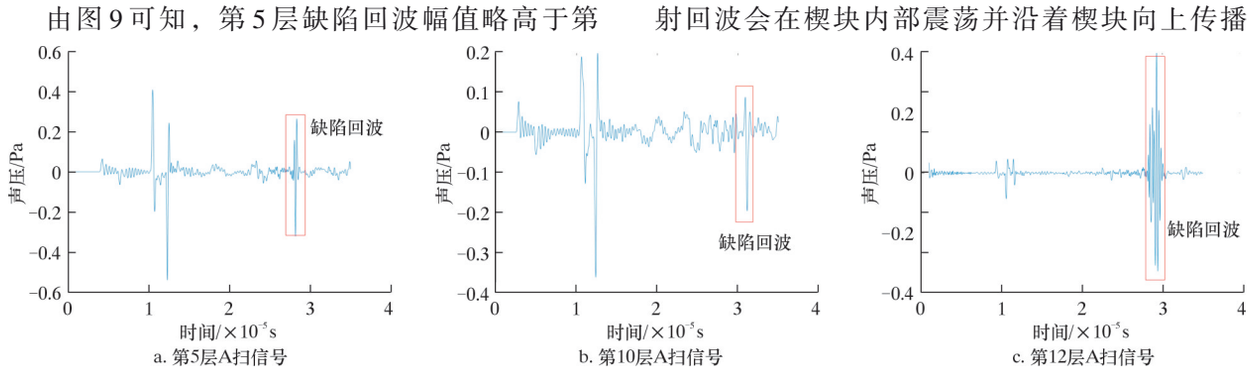


图 9　相控阵分层聚焦检测合成 A 扫信号

Fig. 9　Phased array layered focusing detection of synthetic A-scan signals

因此第5层和第10层的A扫信号合成后其非缺陷处也呈现出震荡。而激励始波为正弦脉冲，扫查模式为自发自收的模式下，界面的反射波在合成时会相互抵消，因此第12层的A扫信号在非缺陷处较为平滑。

分析上述仿真过程可知，在针对油气管道焊缝的超声相控阵检测中，可以将焊缝分层并分别设计不同层的激发阵元和延迟法则，使声波在目标层具有最好的聚焦效果。在遇到缺陷时，声波会在缺陷表面发生反射，反射回波被接收阵元接收，并转化为A扫信号；通过提取A扫信号中的缺陷回波幅值和波形特征，以及缺陷回波与界面波之间的时间延迟，即可综合分析缺陷的形态、位置及大小。超声相控阵探测未熔合缺陷的信号呈现单峰高幅值，单个气孔的缺陷信号为单峰凸起，两侧有锯齿状小峰，符合缺陷图谱规律。

综上，模型在第5层、第10层坡口未熔合及第12层根焊气孔缺陷处，其回波信号的最大幅值均可达到激励始波幅值的40%。这表明分层聚焦工艺能够确保声束能量在目标深度区域高度集中，从而获得极高的缺陷回波响应。需要指出的是，本次有限元仿真基于2 mm规则圆形缺陷建立。在实际工程应用中，裂纹、未熔合等真实缺陷往往呈现不规则的三维形态，其声束散射特征更为复杂。因此，针对不规则形状缺陷的相控阵检测特征响应及定量评估方法，将是下一步验证与研究的重点。

3　焊缝超声相控阵分层聚焦检测试验

运用所提的CRC型焊缝超声相控阵分层检测方法，针对某新型管道的CRC型焊缝，按照NB/T 47013. 15—2021标准设计了分层检测工艺和检测对比试块[20]，并开展了相控阵检测试验。试验时在管道上布置好自动扫查器，扫查器沿滑轨移动，由按钮控制电机的启停，并接有喷水管对被测材料表面喷水充当耦合剂（见图10）。

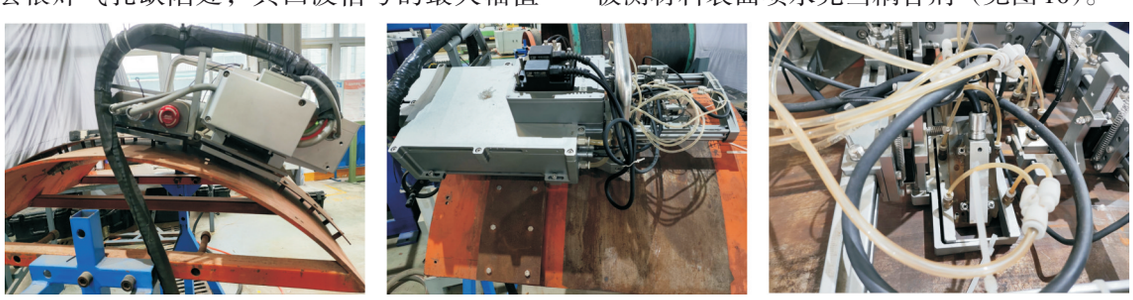


图10　扫查器布置图

Fig. 10　Scan arrangement

检测对比试块扫查图像如图11所示。每层设置连续分布的ø2 mm平底孔，中央设置直径2 mm通孔。每一列通道表示焊缝中单层的扫查结果，同一高度则表示焊缝中间的同一深度，正中间通道为TOFD扫查后生成的B扫图像，用以做参照验证分层扫查的结果并调节扫查仪器的各项参数，TOFD左右两侧分别是左右两侧扫查的结果。

图11中正中间的TOFD通道呈现灰度条状衍射信号，用以指示焊缝深度的基准；其左右两侧分布的彩色斑状信号即为相控阵各分层通道捕捉到的缺陷回波。通过比对这些彩色高亮斑点的横纵坐标，可直观判读出平底孔及通孔缺陷的具体分布层位与形态特征。

该焊缝被分为12层检测，从模拟试块的分层检测图像中可以看出，明显检出7个不同缺陷（见图12），并且对跨越多个分区的缺陷有着直观的展示。7个缺陷的自身高度检测结果如表3所示。将3次分层检测结果求平均值，并以TOFD检测的结果为参照计算其相对误差。由表3可知，所有缺陷的相对误差均控制在8%以内。该误差的主要来源包括：相控阵探头对中扫查时的微小机械偏移、被测管材局部声速的标定偏差，以及仪器系统信号处理时的延时离散性。因此超声相控阵分层检测方法对管道CRC型焊缝整体有着完整的覆盖性

表3　分层检测结果

Table 3　Results of layered detection

缺陷编号	缺陷层数	TOFD检测结果/mm	分层检测结果/mm			相对误差/%
			1	2	3	
1	7	5.07	5.32	5.32	5.03	3.0
2	11	1.36	1.30	1.30	1.30	4.5
3	10	1.29	1.19	1.32	1.21	3.9
4	4	2.76	2.58	2.54	2.54	7.4
5	11	1.93	1.88	1.89	1.96	2.1
6	9~10	4.83	5.09	4.90	4.84	2.6
7	6~7	6.37	6.15	6.13	5.72	5.8

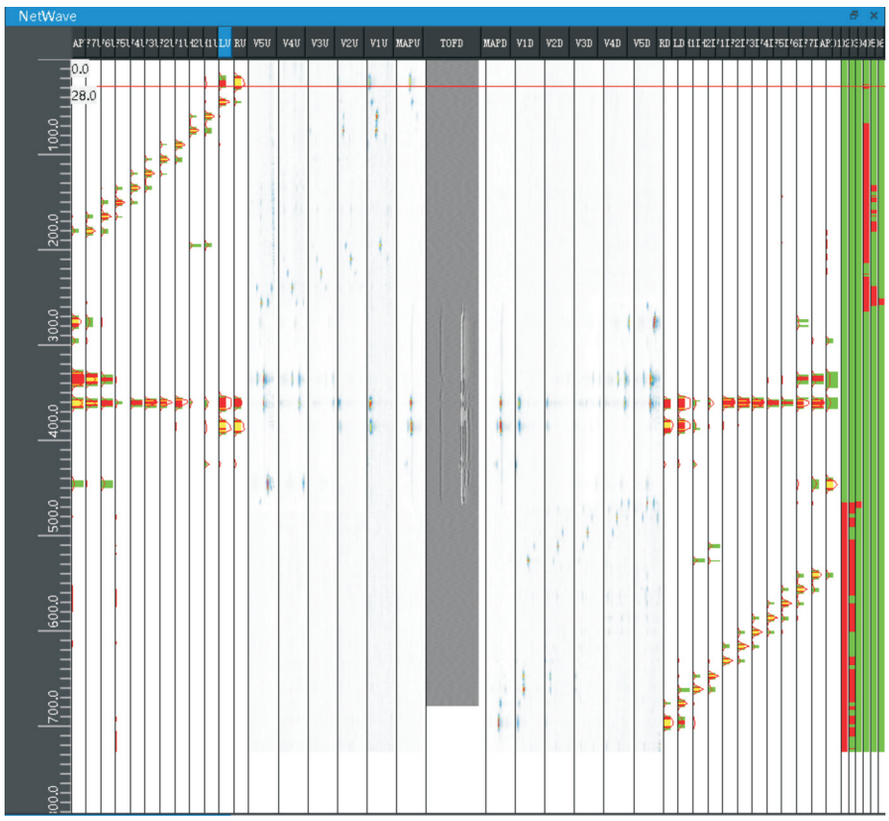


图 11　对比试块分层检测图像

Fig. 11　Layered detection image of reference test block

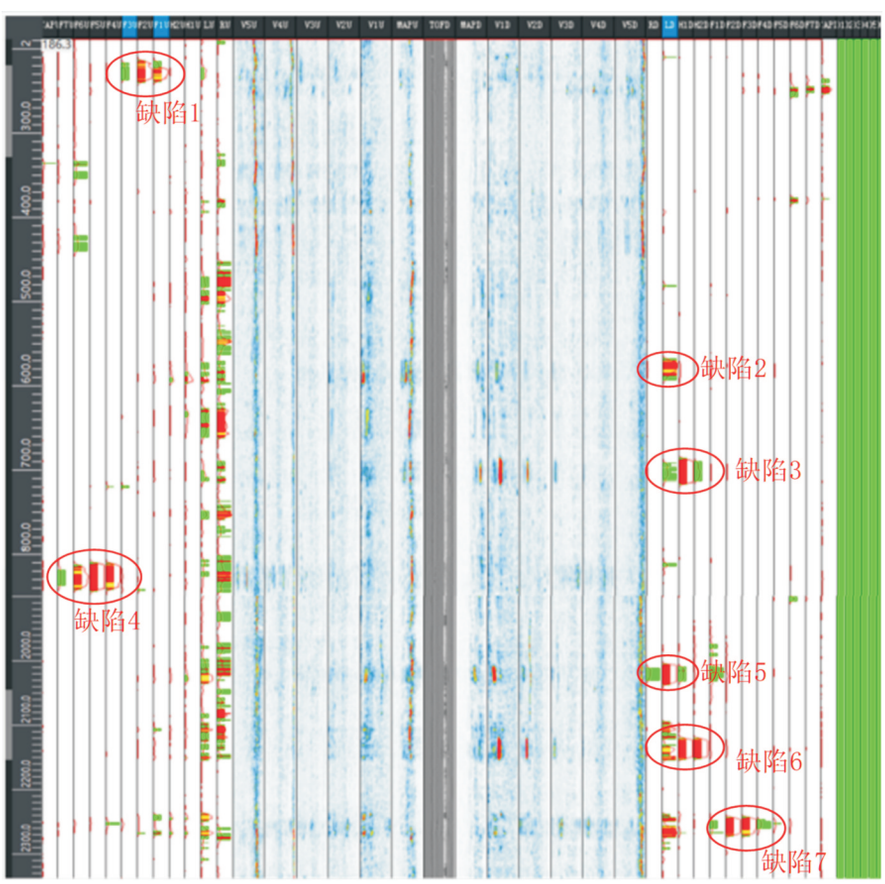


图 12　模拟试块分层检测图像

Fig. 12　Layered detection image of simulated test block

和良好的缺陷检出效果。

另外，在实际工业扫查过程中，该方法的先进性主要体现在声束的电子偏转控制与检测效率的显著提升上。传统检测方案需依赖多组探头在轴向进行往复的机械扫查以覆盖不同深度的坡口面，这导致单次检测的辅助准备时间长、效率低。而该方法在实际作业时，扫查器仅需沿管壁环向进行单次线性轨迹移动，探头内部则依托脉冲延迟法则在深度方向上完成分层声束的快速电子偏转与切换。这种模式免除了复杂扫查机构在轴向的频繁机械换向与对中调校，大幅缩短了单个检测周期。

4　结论及认识

（1）推导了CRC型焊缝相控阵分层聚焦延迟法则计算方法，建立了CRC型管道焊缝超声相控阵分层聚焦检测工艺设计方法。该方法通过在特定层级上聚焦检测信号，显著提高了检测信号的清晰度和识别精度，增强了缺陷识别能力，并为后续的修复工作提供了可靠依据。

（2）建立了CRC型管道焊缝超声相控阵分层聚焦检测有限元仿真模型，在压力声学瞬态物理场中，模型在第5层、第10层坡口未熔合及第12层根焊气孔缺陷处，其回波信号的最大幅值均可达到激励始波幅值的40%左右，验证了分层聚焦检测工艺的可行性。

（3）在CRC型管道焊缝无损检测试验中，分层聚焦检测技术对焊缝展现出良好的逐层分析能力，与常规TOFD检测相比，缺陷自身高度的测量相对误差控制在8%以内。

（4）该方法通过电子偏转免去了复杂扫查机构的频繁机械移动，在提升现场检测作业效率、降低设备综合检测成本方面展现出技术可行性，具有良好的工程应用潜力。

参　考　文　献

[1] 李秋扬，赵明华，张斌，等. 2020年全球油气管道建设现状及发展趋势［J］. 油气储运，2021，40（12）：1330-1337，1348.
Li Qiuyang，Zhao Minghua，Zhang Bin，et al. Current construction status and development trend of global oil and gas pipelines in 2020［J］. Oil & Gas Storage and Transportation，2021，40（12）：1330-1337，1348.

[2] 李秋扬，赵明华，任学军，等. 中国油气管道建设现状及发展趋势［J］. 油气田地面工程，2019，38（增刊1）：14-17.
Li Qiuyang，Zhao Minghua，Ren Xuejun，et al. Construction status and development trend of Chinese oil & gas pipeline［J］. Oil-Gas Field Surface Engineering，2019，38（S1）：14-17.

[3] 高振宇，张慧宇，高鹏. 2022年中国油气管道建设新进展［J］. 国际石油经济，2023，31（3）：16-23.
Gao Zhenyu，Zhang Huiyu，Gao Peng. New progress in China's oil and gas pipeline construction in 2022［J］. International Petroleum Economics，2023，31（3）：16-23.

[4] 贺扬. 浅析油气储运中的安全隐患及防范措施［J］. 中小企业管理与科技（上旬刊），2021，（10）：131-133.
He Yang. Analysis of safety hazards and preventive measures in oil and gas storage and transportation［J］. Management & Technology of SME，2021，（10）：131-133.

[5] 任伟，帅健，张银辉，等. X80管道环焊缝可靠性及其影响因素分析［J］. 压力容器，2024，41（7）：32-39.
Ren Wei，Shuai Jian，Zhang Yinhui，et al. The analysis on reliability and affecting factors of X80 pipeline girth weld［J］. Pressure Vessel Technology，2024，41（7）：32-39.

[6] 李亮，黄磊，聂向晖，等. 含缺陷X70管线钢环焊缝检验及分析［J］. 压力容器，2021，38（2）：66-72，86.
Li Liang，Huang Lei，Nie Xianghui，et al. Inspection and analysis of defect-containing girth welds cut off from the X70 pipeline in service［J］. Pressure Vessel Technology，2021，38（2）：66-72，86.

[7] 吴冲，王子成. 超声检测模拟仿真软件应用与发展现状［J］. 工具技术，2018，52（11）：7-10.
Wu Chong，Wang Zicheng. Application and development status of simulation software for ultrasonic testing［J］. Tool Engineering，2018，52（11）：7-10.

[8] 张杰，薛一菡，丁奕，等. 考虑腐蚀缺陷的管道内检测周期优化方法［J］. 石油机械，2020，48（5）：107-113.
Zhang Jie，Xue Yihan，Ding Yi，et al. Optimization method of pipeline inspection period considering corrosion defects［J］. China Petroleum Machinery，2020，48（5）：107-113.

[9] 李晓龙，陈金忠，马义来，等. 油气管道复合变形内检测技术研究［J］. 石油机械，2021，49（8）：152-158.
Li Xiaolong，Chen Jinzhong，Ma Yilai，et al. A com-

posite in-line detection technology for oil and gas pipeline deformation ［J］. China Petroleum Machinery, 2021, 49（8）: 152-158.

［10］ 辛佳兴，陈金忠，李晓龙，等. 油气管道内检测技术研究前沿进展［J］. 石油机械，2022，50（5）：119-126.
Xin Jiaxing, Chen Jinzhong, Li Xiaolong, et al. Advances in oil and gas pipeline internal inspection technology ［J］. China Petroleum Machinery, 2022, 50（5）: 119-126.

［11］ 曹敏，汤历平，王锡军，等. 长输油气管道环向表面裂纹扩展特性研究［J］. 石油机械，2024，52（12）：125-133.
Cao Min, Tang Liping, Wang Xijun, et al. Propagation characteristics of circumferential surface cracks in long distance oil and gas pipelines ［J］. China Petroleum Machinery, 2024, 52（12）: 125-133.

［12］ 周琳，肖永达. 管道内检测技术的发展现状［J］. 河南化工，2020，37（4）：57-58.
Zhou Lin, Xiao Yongda. Current status of development of in-pipe inspection technology ［J］. Henan Chemical Industry, 2020, 37（4）: 57-58.

［13］ 袁婷婷. 燃气管道超声波内检测技术［J］. 煤气与热力，2017，37（2）：101-104.
Yuan Tingting. Ultrasonic internal detection technology for gas pipeline ［J］. Gas & Heat, 2017, 37（2）: 101-104.

［14］ 吴勇，齐迎春，许衍，等. 管道环焊缝的相控阵超声检测［J］. 无损检测，2023，45（12）：57-62.
Wu Yong, Qi Yingchun, Xu Kan, et al. Phased array ultrasonic testing of grith weld of pipeline ［J］. Nondestructive Testing, 2023, 45（12）: 57-62.

［15］ 张子健，吕钟杰，沈正祥，等. 承压设备对接焊缝特殊结构相控阵超声CIVA模拟与检测应用［J］. 电焊机，2022，52（12）：43-50.
Zhang Zijian, Lü Zhongjie, Shen Zhengxiang, et al. Ultrasonic phased array CIVA simulation and detection of special structure of butt weld of pressure equipment ［J］. Electric Welding Machine, 2022, 52（12）: 43-50.

［16］ 杨锋平，卓海森，罗金恒，等. 油气输送管失效案例与原因分析［J］. 石油管材与仪器，2015，1（3）：63-66.
Yang Fengping, Zhuo Haisen, Luo Jinheng, et al. Study of failure cause in some failure cases in oil and gas pipeline ［J］. Petroleum Instruments, 2015, 1（3）: 63-66.

［17］ 杨锋平，张硕，王明波，等. 油气管道环焊缝缺陷检测评价方法研究［J］. 石油管材与仪器，2019，5（6）：11-15.
Yang Fengping, Zhang Shuo, Wang Mingbo, et al. Study on detection and evaluation method of girth weld defects in oil and gas pipeline ［J］. Petroleum Instruments, 2019, 5（6）: 11-15.

［18］ 黄亮亮，郭磊，尹长华，等. 含裂纹管道环焊缝轴向承载能力及成因分析［J］. 焊接技术，2025，54（9）：32-36，146.
Huang Liangliang, Guo Lei, Yin Changhua, et al. Axial carrying capacity and failure analysis of girth weld crack in pipelines ［J］. Welding Technology, 2025, 54（9）: 32-36, 146.

［19］ NB/T 47013.15—2021　承压设备无损检测　第15部分：相控阵超声检测［S］.
NB/T 47013.15—2021 Nondestructive testing of pressure equipment Part 15: phased array ultrasonic testing ［S］. 2021.

［20］ 卢秉恒，孙苗，张建勋，等. 金属增材制造在油气领域的研究现状及展望［J］. 焊管，2025，48（8）：1-8.
Lu Bingheng, Sun Miao, Zhang Jianxun, et al. Research status and prospect of metal additive manufacturing in oil and gas field ［J］. Welded Pipe and Tube, 2025, 48（8）: 1-8.

第一作者简介： 姚　欢，高级工程师，生于1982年，2011年毕业于西安石油大学材料工程专业，获硕士学位，现从事石油装备无损检测技术研究和设备开发工作。地址：（710077）陕西省西安市。email：yaohuan@cnpc.com.cn。

修改回稿日期： 2026-03-09

（本文编辑　任　武）