◇ 研究报告 ◇

B型套筒角焊缝缺陷相控阵超声检测定量方法*

刘 琰¹ 吴宇轩² 杨锋平¹ 陶荣德³ 张鸿博¹ 贾鹏军¹ 裴翠祥^{2†} 邓 刚⁴

(1 中国石油集团工程材料研究院有限公司 西安 710077)

(2 西安交通大学航天航空学院 机械结构强度与振动国家重点实验室 西安 710049)

(3 长庆油田分公司第八采油厂 西安 710018)

(4 国家管网西部管道公司 乌鲁木齐 830000)

摘要:B型套筒修复作为油气管道修复的主要方式之一,在其修复的焊接过程中,该结构的环形角焊缝内部常常出现以气孔、夹渣为代表的孔型缺陷。这类缺陷由于角焊缝特殊的结构,在利用相控阵超声无损检测技术对其检测时,难以对其进行定量分析。通过数值模拟和实验,发现通过相控阵超声扇扫得到缺陷回波信号峰值与孔型缺陷直径呈正相关,为孔型缺陷的定量分析提供了一种可靠的手段。 关键词:相控阵超声;B型套筒角焊缝;无损检测;数值模拟;定量分析 中图法分类号:TE832 文献标识码:A 文章编号:1000-310X(2023)01-0145-09 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2023.01.019

The quantitative method of phased array ultrasonic testing for type-B sleeve fillet weld defects

LIU Yan¹ WU Yuxuan² YANG Fengping¹ TAO Rongde³ ZHANG Hongbo¹ JIA Pengjun¹ PEI Cuixiang² DENG Gang⁴

(1 CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China)

(2 State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Astronautics, Xi'an Jiaotong University,

Xi'an 710049, China)

(3 NO.8 Oil Production Plant of Petrochina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China)

(4 PipeChina West Pipeline Company, Urumqi 830000, China)

Abstract: Type-B sleeve repair is one of the main ways of oil and gas pipeline repair. In the welding process of repair, the hole defects represented by pores and slag inclusions often appear in the annular fillet weld of this structure. Due to the special structure of the fillet weld, it is difficult to analyze the defects quantitatively when using phased array ultrasonic nondestructive testing technology. Through numerical simulation and experiment, it is found that the peak value of defect echo signal obtained by phased array ultrasonic sector scanning is positively correlated with the diameter of hole defect, which provides a reliable method for quantitative analysis of hole defect.

Keywords: Phased array ultrasonic; Type-B sleeve fillet weld; Nondestructive testing; Numerical simulation; Quantitative analysis

²⁰²²⁻⁰⁸⁻²⁷ 收稿; 2022-11-04 定稿

^{*}国家重点研发计划项目 (2020YFB1901504)

作者简介:刘琰(1975-),男,江苏无锡人,硕士,研究方向:石油管材及装备无损检测。

[†]通信作者 E-mail: pei.cx@xjtu.edu.cn

0 引言

作为最普遍、最经济、最安全的运输方式,管 道运输在中国能源储运方式中占据了极为重要的 地位。截至2020年底,中国油气管道总里程达到 16.5×10^4 km,至2025年,我国长输管道总里程预 计将超过24×10⁴ km。管道运输已成为保障我国 能源安全的生命线[1]。然而我国陆上油气管道中约 有一半处于老化的阶段,管道老化腐蚀问题,已严重 制约我国油气管道的运输安全^[2]。针对老化腐蚀的 管道,主要有两种修复方式:传统修复方式和在役焊 接修复方式。传统修复方式需要对管道进行停输停 压处理,不仅会带来经济损失,还会造成环境的污 染。而B型套筒修复技术作为有效的在役焊接修复 方式,可以有效克服这两个问题,因此正逐渐成为主 要的修复方式^[3-6]。在B型套筒修复技术实施的过 程中,需要大量地采用环形角焊缝焊接将套筒与管 道焊接固定^[7],而在焊接的过程当中,环形角焊缝 区域内常常会产生气孔、夹渣等缺陷,这些缺陷的 存在会影响修复质量,甚至产生泄漏隐患^[8-9]。因 此,需要通过有效的检测手段对角焊缝内部缺陷进 行定量分析。

相控阵超声检测技术由于其检测速度快、信噪 比高、可检深度大、缺陷定位准确、便于工程应用 的优点,目前正愈发广泛地应用于管道焊缝的检测 中^[10-12]。然而,现有的检测方法仅能实现对缺陷 的有效定位,在缺陷的定量方面仍然有较大局限。 由于B型套筒角焊缝结构的特殊性,对于以气孔、 夹渣为代表的径向剖面内呈圆形的孔型缺陷的相 控阵超声检测,缺陷的定量一直是一个难题^[13-17]。 本文通过数值模拟与实验相结合,研究采用相控阵 超声无损检测对B型套筒角焊缝内气孔、夹渣等孔 型缺陷扇扫时,通过检测信号中的不同特征可以有 效判定缺陷的大小。

1 数值模拟

1.1 B型套筒角焊缝数值模拟方法

在B型套筒角焊缝结构(如图1(a)所示)的相 控阵超声检测中,通常将斜入射相控阵探头置于套 筒外壁(如图1(b)所示)对角焊缝区域的缺陷进行 扇扫检测。根据延时聚焦法则^[18]:

$$\Delta t_i = \frac{1}{v} \left(\sqrt{d_f^2 + x_i^2 - 2d_f x_i \cos(\theta + \pi/2)} - d_f \right),$$
(1)

其中,i为从聚焦反方向最外侧阵元开始计数的阵 元序号; Δt_i 为第i个阵元的激励信号延迟时间(s); d_f 为聚焦深度(m); x_i 为阵元相对位置(m); θ 为聚 焦偏转角弧度(rad);v为超声波波速(m/s)。压电相 控阵探头激励偏转聚焦的超声波,超声波在传播路 径上遇到气孔、夹渣等缺陷时会产生反射波,利用 探头接收这些异质界面产生的反射波,再根据延时 叠加成像算法得到能够显示缺陷的扇扫成像。



(b) 角焊缝相控阵超声检测方法



采用相控阵超声对B型套筒角焊缝结构进行 检测时,声波的传播与缺陷的成像主要是沿着管道 的径向切面,想要获得缺陷的周向位置和大小信息 只需要通过不同周向角度下扇扫结果的合成。因此 只需要建立二维的数值模拟模型,就可以充分地模 拟B型套筒角焊缝相控阵超声检测,同时还可以极 大地减小计算量,提高计算效率。因此,根据图1(b) 中角焊缝相控阵超声检测方法的示意图,建立图2 所示的二维B型套筒角焊缝数值模拟基本模型^[19]。 本研究所采用的B型套筒及焊缝的材料为X70管 线钢,因此将数值模拟的材料参数设置与X70管线 钢一致,其材料弹性模量为210 GPa,泊松比为 0.3, 密度7.85×103 kg/m³,管道壁厚12.8 mm, 套筒壁 厚20 mm, 套筒和管道间隙2 mm。根据B型套筒 角焊缝检测的数值模拟研究^[18],在对该结构检测 时采用横波相较纵波具有更好的效果。因此本研 究的数值模拟中采用的探头为斜入射横波相控阵 超声探头,探头阵元大小为0.6 mm,阵元中心间 距0.8 mm,中心频率为5 MHz,激发阵元数为16。 根据材料性质和探头频率计算得到横波波速约为 3217.92 m/s,波长约为0.6436 mm,选取模型中网 格大小为0.025 mm,计算的时间步长为2.5 ns。在



图 2 B型套筒角焊缝相控阵超声检测数值模拟基本模型

Fig. 2 Basic model for numerical simulation of phased array ultrasonic testing of type-B sleeve fillet welds 二维数值模拟模型中,通过在角焊缝区域设置圆形 缺陷的方式,模拟该区域在三维空间内的气孔、夹 渣等圆孔型缺陷。

1.2 不同尺寸缺陷扇扫模拟结果及定量分析

为了对不同尺寸的缺陷进行定量分析,在图2 所示的数值模拟模型中,以探头最右侧阵元中心 为参考点,以深度16 mm、轴向距离22 mm的点 为圆心,分别设置直径0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm、 2.0 mm、2.5 mm和3.0 mm的圆形缺陷(如图3所 示)。对这6个模型进行相控阵超声扇扫数值模拟计 算,得到同一位置不同大小缺陷的扇扫成像(如图4 所示)。从扇扫结果中可以发现,对于这类小尺寸缺 陷(直径 ≤3.0 mm),随着直径的增加,缺陷成像大 小变化很小,因此无法通过扇扫成像判断圆形缺陷 的大小。

相控阵超声扇扫的关键是各个角度下缺陷信 号的时域信息和回波峰值。时域信息体现了缺陷的 位置信息,而利用回波峰值的大小可以判断该角度 下是否有缺陷,进而判断缺陷在扫查平面内,尤其是 扫查方向下的大小。从扇扫图像中可以发现,随着 缺陷直径的增加,成像峰值也在提高,这会影响缺陷 的成像大小。为了进一步研究缺陷成像大小与缺陷





Fig. 3 Numerical simulation model of phased array ultrasonic testing for type-B sleeve fillet welds



图4 角焊缝内部缺陷扇扫成像数值模拟

Fig. 4 Numerical simulation of sector scan imaging of internal defects in fillet welds

直径之间的关系,读取扇扫回波信号中每个角度 下缺陷的回波信号峰值(如图5所示)。通过不同直 径缺陷在各个扫查角度下的峰值曲线,计算得到半 高宽(如表1所示),可以发现不同大小缺陷回波峰 值构成的曲线的半宽高与缺陷直径之间并无明显 规律。





然而,从图5可以看出,随着缺陷直径的增加, 回波峰值曲线的最大值也在增加。提取各直径缺陷 扇扫信号回波峰值曲线的最大值(如表2所示),使 用线性拟合算法和二次多项式拟合算法分别对缺陷回波峰值最大值与直径之间的关系进行拟合(如图6所示)。通过拟合可以发现,二次多项式拟合得到的残差平方和远小于线性拟合得到的残差平方和,因此可以得到:在B型套筒角焊缝缺陷相控阵超声检测中,扇扫得到的缺陷回波峰值最大值与缺陷直径随着缺陷直径的增加而增加,且峰值最大值与直径之间近似呈二次函数关系。

表1 不同大小缺陷回波峰值半高宽

Table 1 Full width at half maximum of echo peak value of defects with different sizes

直径/mm	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
半高宽/(°)	4.247	3.843	3.887	3.854	3.819	3.830

表2 不同大小缺陷回波峰值最大值

Table 2Maximum echo peak value of de-fects with different sizes

直径/mm	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
回波峰值 最大值/V	6.828	9.722	13.3402	16.0157	18.8117	21.2198





1.3 不同深度缺陷扇扫模拟结果及定量分析

为了进一步验证缺陷回波峰值最大值与缺陷 直径之间关系的普遍性,需要模拟更多位置缺陷 的相控阵超声扇扫。因此,以探头最右侧阵元中心 为参考点,分别以深度12 mm和20 mm、轴向距 离22 mm的点为圆心,设置直径0.5 mm、1.0 mm、 1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm和3.0 mm的圆形缺陷, 其中含直径1.0 mm缺陷的角焊缝数值模拟模型如 图7所示。

对所建立的12个模型进行相控阵超声扇扫的 数值模拟计算,并分别使用线性拟合算法与二次多 项式拟合算法对不同深度下扇扫得到的缺陷回波 峰值与缺陷直径进行拟合(如图8所示)。从图8中 可以看出,无论是深度为12 mm的缺陷还是深度为 20 mm的缺陷,其回波峰值最大值与缺陷直径均呈 正相关。且由于二次多项拟合所得到的残差平方和 均小于线性拟合的残差平方和,因此回波峰值最大 值与缺陷直径之间更加符合二次函数关系。通过数 值模拟可以初步证明:通过相控阵超声扇扫得到的 B型套筒角焊缝内部孔型缺陷的回波峰值最大值可 以用于对其进行定量分析。为了证明该结论的可靠 性,还需要通过实验进一步验证。



图 7 含直径 1.0 mm 缺陷的角焊缝数值模拟模型 Fig. 7 Numerical simulation model of fillet weld with

1.0 mm diameter defect

2 实验验证

为了进一步验证通过数值模拟得到的结论, 设计并加工在深度16 mm、距离角焊缝环向边界 3 mm 处,存在直径分别为1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm 和3.0 mm的圆孔型缺陷的实验试样(如图9和图10 所示),以模拟实际工况下焊缝内部可能产生的气孔 或夹渣等缺陷。

对加工的试样进行相控阵超声检测时,首先使 用X70管线钢加工出一组不同深度、直径2.0 mm 横通孔作为标准试块,采用HSPA20-E相控阵超声 检测仪对标准试块进行检测,通过调节增益的方式 将聚焦声程33 mm的横通孔的回波峰值调节为屏 幕显示的80%。再使用该相控阵超声检测仪对实际 加工的试块进行相控阵超声检测,检测信号的横坐 标为声程,纵坐标为屏幕显示的百分比,并得到扇扫 检测结果(如图11所示)。从图11中可以看出,在实 验中得到的缺陷扇扫成像的大小与缺陷直径无明 显关系。同时,在实验中也无法通过半高宽的方法 确定缺陷的大小。拾取不同大小缺陷扇扫信号得到 回波幅值的最大值(如表3所示),其中回波峰值强 度的通过屏幕范围的百分比来表示。可以发现,在 实验中缺陷回波幅值最大值随着缺陷直径的增加 而增加,该规律与数值模拟得到的规律一致。









Fig. 9 Design of experimental specimens



(a) 缺陷直径1.0 mm



(c) 缺陷直径2.0 mm



(b) 缺陷直径1.5 mm



(d) 缺陷直径3.0 mm





(a) 缺陷直径1.0 mm



(b) 缺陷直径1.5 mm



(c) 缺陷直径2.0 mm



(d) 缺陷直径3.0 mm



Fig. 11 Quantitative analysis of experimental results of phased array ultrasonic testing of type-B sleeve fillet welds

表 3 实验结果中不同大小缺陷回波峰值最大值 Table 3 Maximum echo peak value of defects with different sizes in the experimental results

直径/mm	1.0	1.5	2.0	3.0
百分比/%	76.1	122.4	164.7	192.2

将实验得到的缺陷回波峰值最大值与缺陷直 径进行二次多项式拟合(如图12所示),发现能够获 得良好的拟合效果。通过该实验证明,缺陷回波峰 值最大值与缺陷直径之间具有二次函数关系。因此, 在实际的相控阵超声检测中,可以通过制作标准试 样的方式对B型套筒内部气孔、夹渣等孔型缺陷的 大小进行标定,即通过标准试样得到回波信号峰值 最大值与缺陷直径之间的二次函数拟合关系,再将 实际缺陷的回波信号峰值最大值代入二次函数中, 就可以得到缺陷的直径。



图 12 B型套筒角焊缝相控阵超声定量分析实验检 测结果

Fig. 12 Quantitative analysis of experimental results of phased array ultrasonic testing of type-B sleeve fillet weld

为了进一步比较数值模拟与实验得到的结果, 以3.0 mm缺陷为基准,将二者得到的不同单位的 缺陷回波峰值最大值进行归一化处理,对数值模拟 的结果进行二次多项式拟合,并将实验数据与之进 行比较(如图13所示)。数值模拟拟合得到的二次 函数为

 $y = 0.1512 + 0.34044 \times x - 0.02525 \times x^2, \quad (2)$

其中, *x*为缺陷直径 (mm), *y*为缺陷回波峰值最大 值的归一化结果。由于是以 3.0 mm 缺陷的检出数 据为基准,将实验测得的直径1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm缺陷回波峰值最大值代入公式(2),得到表4。其中通过数值模拟的拟合函数能够较为精确地判断1.5 mm缺陷的大小,而另外两个缺陷直径的判定存在着一定的误差。



图 13 实验结果与数值模拟结果的归一化对比 Fig. 13 Normalized comparison between experimental results and numerical simulation results

表4 实验与数值模拟对比结果

Table 4 Comparison results of experimentand numerical simulation

实际直径/mm	1.0	1.5	2.0
实验测量归一化信号幅值	0.3959	0.6368	0.8569
计算直径/mm	0.75	1.56	2.39
相对误差/%	25	4	19.5

3 结论

(1)针对B型套筒角焊缝内部气孔、夹渣等圆 孔型缺陷难以定量的问题,建立了B型套筒角焊 缝相控阵超声检测定量分析的二维数值模拟计算 模型。

(2)通过数值模拟得到相同位置不同大小圆孔型缺陷在不同扫查角度下的检测信号并得到扇扫成像。发现缺陷的扇扫成像大小、回波信号峰值的半高宽均与缺陷大小无明显关联,因此无法通过这两个指标判定缺陷大小。而缺陷回波信号峰值的最大值与缺陷直径呈正相关,且近似满足二次函数关系。

(3)根据数值模拟模型,加工出在同一位置含 有不同直径贯穿孔的几组试样,并进行相控阵超声 检测实验,通过实验证实了数值模拟得到的结论:可 以通过缺陷回波信号峰值的最大值判断圆孔型缺陷直径的大小,进而实现这类缺陷的定量分析。

(4) 通过数值模拟与实验结果的比较,发现可 以通过数值模拟计算得到某一位置圆孔型缺陷的 回波峰值最大值-缺陷直径的二次多项式拟合曲线, 并通过该曲线以及圆孔型缺陷实测的峰值最大值 估计实际缺陷的大小。不过该结果目前还存在着一 定的误差,在未来的研究当中可以进一步优化该方 法以提升定量精度。

参考文献

 王婷, 王新, 李在蓉, 等. 国内外长输油气管道失效对比 [J]. 油 气储运, 2017, 36(11): 1258–1264.
 Wang Ting, Wang Xin, Li Zairong, et al. Comparison on failures of long-distance oil & gas pipelines at home and

abroad[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(11): 1258-1264. [2] 冼国栋,杨锋平,魏国昌,等. 在役 X80 级管道 B 型套筒等强

- [2] 沉固标, 杨祥干, 魏国白, 寺. 仁仪 X80 级官道 B 空装同寺强 设计程序和方法思考 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(1): 110–112.
- [3] 董绍华. 中国油气管道完整性管理 20 年回顾与发展建议 [J]. 油气储运, 2020, 39(3): 241-261.
 Dong Shaohua. Review of China's oil and gas pipeline integrity management in the past 20 years and development suggestions[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(3): 241-261.
- [4] 胡秀. X80 管道含缺陷环焊缝的钢质环氧套筒修复研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- [5] 陈安琦, 马卫锋, 任俊杰, 等. 高钢级管道环焊缝缺陷修复问题初探 [J]. 天然气与石油, 2017, 35(5): 12–17.
 Chen Anqi, Ma Weifeng, Ren Junjie, et al. Study on rehabilitation of high steel pipeline girth weld defects[J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35(5): 12–17.
- [6] 李荣光,张巍,于憬,等.《油气管道管体缺陷修复技术规范》 解读 [J]. 石油工程建设, 2020, 46(3): 88–92.
 Li Rongguang, Zhang Wei, Yu Jing, et al. Interpretation of "Technical Specification for Defect Repair of Oil & Gas Pipeline"[J]. Petroleum Engineering Construction, 2020, 46(3): 88–92.
- [7] 李荣光,张巍,赵振,等. 高钢级管道环焊缝缺陷修复技术探讨 [J]. 油气储运, 2020, 39(3): 307-312, 360.
 Li Rongguang, Zhang Wei, Zhao Zhen, et al. Discussion on repair technology of girth weld defects of high-grade steel pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(3): 307-312, 360.
- [8] 蔡梓建. X80 管道环焊缝缺陷的钢质环氧套筒修复补强研 究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
- [9] 黄磊,李亮,李汝江,等. B型套筒搭接焊缝的相控阵超声检测
 [J]. 无损检测, 2021, 43(5): 49–53.

Huang Lei, Li Liang, Li Rujiang, et al. Phased array ultrasonic testing for the lap weld of B-type sleeve[J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(5): 49–53.

- [10] 李衍. 焊缝超声相控阵扇形扫查的覆盖范围(续)[J]. 中国特种 设备安全, 2011, 27(6): 40-43.
- [11] 冼国栋, 吕游. 油气管道环焊缝缺陷排查及处置措施研究 [J]. 石油管材与仪器, 2020, 6(2): 42–45.
 Xian Guodong, Lyu You. Inspection and disposal of girth weld defects of oil and gas pipelines [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2020, 6(2): 42–45.
- [12] 牟彦春,金南辉,葛翔. 电站锅炉接管座角焊缝超声相控阵检测技术 [J]. 无损检测, 2011, 33(1): 75–76, 78.
 Mou Yanchun, Jin Nanhui, Ge Xiang. Ultrasonic phased array inspection of fillet pipe butt weld for plant boiler[J]. Nondestructive Testing, 2011, 33(1): 75–76, 78.
- [13] 朱子东,杨宏字,朱建伟,等. 长输油气钢质管道维修搭接焊 缝超声探伤 [J]. 管道技术与设备, 2014(1): 33-35, 41. Zhu Zidong, Yang Hongyu, Zhu Jianwei, et al. Ultrasonic inspection of repair lap welds on steal pipeline for longrange transport of oil or gas[J]. Pipeline Technology and Equipment, 2014(1): 33-35, 41.
- [14] 胡川,张涛,邹新伟.油气钢质管道在役修复搭接焊缝缺陷超 声波检测工艺 [J]. 机械, 2016, 43(S1): 82-86.
 Hu Chuan, Zhang Tao, Zou Xinwei. Ultrasonic B-scan NDT inspection method and instrument for lap welds on repaired oil or gas pipeline[J]. Machinery, 2016, 43(S1): 82-86.
- [15] 张双楠, 庞笑, 杨宏字, 等. 油气管道维修中搭接焊缝超声 B 扫描检测方法与设备 [J]. 石油工程建设, 2015, 41(3): 35–38. Zhang Shuangnan, Pang Xiao, Yang Hongyu, et al. Ultrasonic B-scan NDT inspection method and instrument for lap welds on repaired oil or gas pipeline[J]. Petroleum Engineering Construction, 2015, 41(3): 35–38.
- [16] 罗宏建,张浩,邹君文,等. GIS 壳体角焊缝的相控阵超声检测方法 [J]. 浙江电力, 2020, 39(6): 105–110.
 Luo Hongjian, Zhang Hao, Zou Junwen, et al. Research on nondestructive testing of GIS shell fillet weld based on phased array ultrasonic testing[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(6): 105–110.
- [17] 左延田,方雨,刘晴岩,等.角焊缝裂纹类缺陷相控阵超声检测工艺 [J]. 无损检测, 2016, 38(6): 6–9.
 Zuo Yantian, Fang Yu, Liu Qingyan, et al. Phased array ultrasonic testing procedure for cracks in fillets weld[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(6): 6–9.
- [18] 张鸿博, 吴字轩, 胡博, 等. B型套筒角焊缝缺陷相控阵超声 检测方法数值模拟 [J]. 油气储运, 2022, 41(8): 931–938. Zhang Hongbo, Wu Yuxuan, Hu Bo, et al. Numerical simulation of phased array ultrasonic testing method for B-type sleeve fillet weld defects[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(8): 931–938.
- [19] 裴翠祥,陈振茂. 电磁超声的数值模拟方法 [J]. 无损检测,
 2008, 30(9): 603-607.

Pei Cuixiang, Chen Zhenmao. The numerical simulation method for electromagnetic acoustic technique[J]. Nondestructive Testing, 2008, 30(9): 603–607.