

# 直缝埋弧焊钢管超声波相控阵检测工艺技术研究\*

杨艳滨, 汪超, 任国庆, 丁光伟, 刘迪龙, 马建军  
(渤海装备南京巨龙钢管有限公司, 江苏 南京 210061)

**摘要:**介绍了标准中检测焊管典型缺陷的超声波检测探头布置方法。提出了钢管焊缝纵向伤检测方法、横向伤检测方法以及串列式检测方法。通过不同的检测方法灵敏度校验、耦合监视、检测能力的确认, 确保该检测方法可满足油气管道相关标准要求。该检测系统结合自动化校准模式, 通过对比样管人工刻伤对应波形位置, 可以清晰地看出样管上人工检测缺陷的位置误差、漏检和误报等情况, 为钢管自动探伤工作带来方便, 并提高了钢管检测质量。

**关键词:** 钢管; SAWL; 超声波相控阵检测系统

**DOI:**10.19938/j.steelpipe.1001-2311.2024.2.89.94

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Study on Detection Method of Ultrasonic Phased Array Detection System in SAWL Steel Pipe

YANG Yanbin, WANG Chao, REN Guoqing, DING Guangwei, LIU Dilong, MA Jianjun

(Nanjing Julong Steel Pipe Co., Ltd., Bohai Petroleum Equipment Manufacturing Corp., Nanjing 210061, China)

**Abstract:** Described here in the paper is the probe arrangement method for detecting typical defects in the pipe manufacturing process as specified under applicable standard. And also proposed are the longitudinal flaw detection method, transversal flaw detection method, and serial detection method for steel pipe welds. Owing to verifying the sensitivity, coupling monitoring, and confirming the detection capability of different detection methods, the said detection methods are ensured to meet the requirements as specified under applicable standard for oil and gas pipelines. Combined with the automatic calibration mode, and comparing the corresponding waveform positions of the artificial scratch on the reference tube, the detection system is capable of clearly identifying the position error of the manually-measured defect, and any defect-missing and false alarm of the the reference tube, which brings convenience for the automatic detection of the steel pipe, and improves the inspection quality of the steel pipe.

**Key words:** steel pipe; SAWL; ultrasonic phased array detection system

焊管制造过程中主要的无损检测包括: 超声波检测、射线检测、数字射线成像检测(Digital radiography, DR)、磁粉检测, 其中超声波检测、射线检测、DR 射线检测一般都实现了自动化结合人工检测, 磁粉检测在钢管制造厂家一般都是人工检测。焊管在施工现场主要的无损检测包括: 超声波检测、射线检测、超声波相控阵及超声波衍射时差法(Time of Flight Diffraction, TOFD)检测技术, 由于受到施工现场的环境影响, 一般均是人工检测。

随着国家管网集团的成立, 检测标准对检测部

位、缺陷类别等焊管焊缝检测提出了更高要求, 常规超声波检测无论是检测通道数量, 还是自动检测设备均已经很难达到检测标准要求。因此, 在无损检测领域需要一种新型的检测方法以实现钢管焊缝及母材缺陷的全检测。在查阅及调研国内外先进超声波技术的基础上<sup>[1-7]</sup>, 提出了一种超声波相控阵检测技术, 解决了钢管焊缝及热影响区纵向缺陷、钢管内外焊缝中心部位未焊透缺陷、钢管焊缝及热影响区横向缺陷, 包括焊缝、热影响区及焊缝坡口面上纵横向缺陷的检测和检测过程中的耦合监视。

杨艳滨(1972-), 女, 工程师, 主要从事钢管产品研发及标准化管理工作。

### 1 超声波相控阵检测系统介绍

超声波相控阵检测系统是根据石油管行业的需

求而开发的产品，针对钢管焊缝、纵伤、横伤，采用串列、分层等多种方式排列探头的检测系统，其探头布置如图 1 所示，以检测直缝埋弧焊管焊缝缺陷和焊缝两侧 50 mm 的母材缺陷为目的。该系统配备 22 个探头，包括：两套纵向超声波相控阵检测系统“Level 1”和“Level 2”(即 4 个 32 晶元相控阵探头)独立检测焊缝区和焊缝邻近 5 mm 范围的母材内部和外部纵向缺陷；一套“X”型(或两套“K”型)超声波相控阵检测系统“Level 5”和“Level 6”(即 4 个 32 晶元相控阵探头)和一套相控阵轮式探头“Level 3”(即 2 个 32 晶元相控阵探头)检测焊缝和焊缝邻近 5 mm 横向缺陷；一套串列式超声波相控阵检测系统“Level 4”(即 4 个 16 晶元相控阵探头)检测焊缝中部缺陷；一套分层超声波检测系统“Level 7”(即 8 个常规超声波探头，本文不进行描述)检测焊缝两侧 50 mm 的母材分层缺陷。

### 2 样管典型缺陷布置方法

按国家管网集团设计与工程建设准则 DEC-OGP-S-PL-003-2020-1《原油管道工程钢管通用技术规格书》(简称技术规格书)要求，对于 X60 及以上钢级，壁厚在  $32.0\text{ mm} < t \leq 42.0\text{ mm}$  范围的焊

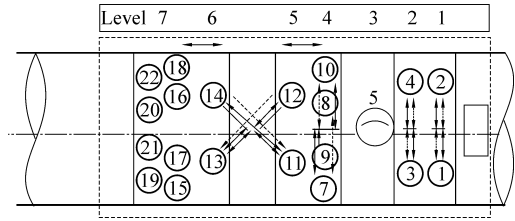


图 1 超声波相控阵检测系统探头布置

管，钢管焊缝区探头的数量/对比反射体应具有 8 个 N5 刻槽(纵向：2 个位于外焊缝边缘，应距焊缝 1.6 mm；2 个位于内焊缝边缘，应距焊缝 1.6 mm；其余 2 个位于内外焊缝中间且分别平行于焊缝。横向：2 个位于焊缝内外表面且垂直于焊缝。N5 刻槽之间有足够间隔，宽度  $\leq 1\text{ mm}$ ，长度  $\leq 50\text{ mm}$ )和 1 个位于焊缝上的  $\Phi 1.6\text{ mm}$  竖通孔，以及焊缝一侧 4 个  $\Phi 3.0\text{ mm}$  平底孔，平底孔中心位于壁厚的 25%、42%、58%和 75%位置。 $\Phi 1.6\text{ mm}$  竖通孔用于各探头灵敏度的确定，N5 刻槽主要用于相应探头检测范围以及对内外表面的检测能力的确定， $\Phi 3.0\text{ mm}$  平底孔用于焊缝内部缺陷检验能力确认。进行钢管探伤时，焊缝检测灵敏度再补偿 2 dB。对比样管人工缺陷分布如图 2 所示，焊缝一侧 25%、42%、58%和 75%壁厚平底孔位置如图 3 所示。

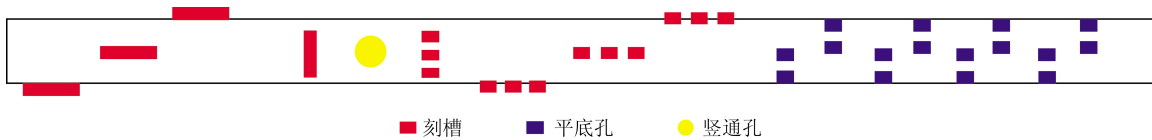


图 2 对比样管人工缺陷分布示意

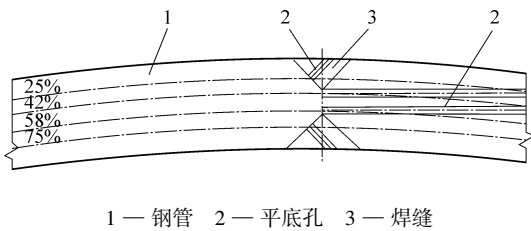


图 3 焊缝一侧 25%、42%、58%和 75%壁厚平底孔位置示意

### 3 钢管焊缝纵向伤检测方法

钢管焊缝纵向伤超声波相控阵检测方法包括超声波相控阵检测探头和管体外表面通过水膜式耦合，在检测时以水为耦合剂。超声波相控阵探头与焊缝垂直布置，相对配置的每一组探头(第 1 组或第 2 组纵向探头)之间的距离可根据钢管的曲率和壁厚进行调整控制检测钢管焊缝的内外纵向伤。

(1) 钢管焊缝纵向伤检测耦合监视。

调试时，首先利用相控阵聚焦法则将每个纵向探头分为 2 个发射单元(或者接收单元)。对比样管调试时，首先在可编程控制器(Programmable Logic Controller, PLC)操作面板中将相应的纵向检测探头组打开，将每组探头置于钢管无缺陷位置，调整探头相对位置使每组探头具有良好的耦合，焊缝纵向检测耦合原理如图 4 所示。图 4(a)中探头 1 发射、探头 2 接收和探头 2 发射、探头 1 接收，即通过探头 1 和探头 2 相互发射和接收的关系实现钢管内焊缝的纵向检测耦合监视；图 4(b)中探头 3 发射、探头 4 接收和探头 4 发射、探头 3 接收，即通过探头 3 和探头 4 相互发射和接收的关系实现钢管外焊缝的纵向检测耦合监视。

(2) 钢管焊缝纵向伤检测灵敏度调整。

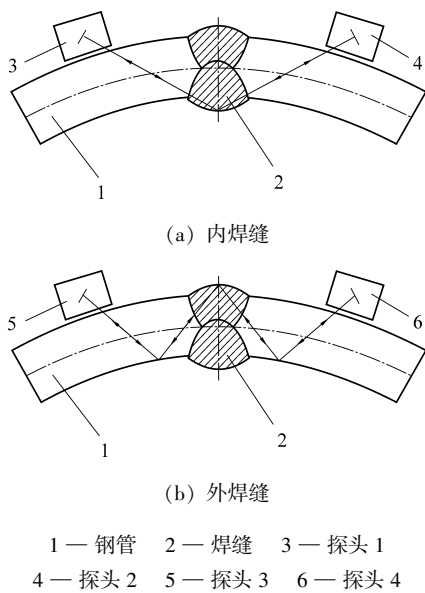


图4 焊缝纵向检测耦合原理

按照技术规格书要求, 钢管焊缝各探头检测灵敏度均以  $\Phi 1.6$  mm 竖通孔来进行确定, 验收为 0 dB (100%FSH)。FSH 为全屏高度(Full Screen Height, FSH)调试时, 将探头移动至对应的  $\Phi 1.6$  mm 竖通孔区域, 调整手轮, 移动探头至合适位置, 打开扇扫页面, 选取合适的角度范围(通常选择  $40^\circ \sim 70^\circ$ )进行扫查, 此时会形成一个在此角度范围内的扇扫图, 移动光标, 通过  $\Phi 1.6$  mm 竖通孔的内外表面选取最优的角度作为纵向探伤角度, 将反射波高调至 100%FSH 作为检测灵敏度评估, 焊缝纵向检测灵敏度校验原理如图 5 所示。图 5(a)中探头 1 和探头 2 通过自发自收的方式对钢管内焊缝检测灵敏度评估, 图 5(b)中探头 3 和探头 4 通过自发自收的方式对钢管外焊缝检测灵敏度评估。

(3) 钢管焊缝纵向伤检测范围以及检测能力的确定。

钢管焊缝纵向伤检测范围以及检测能力是通过内外焊缝 N5 刻槽和焊缝坡口面和/或钝边上  $\Phi 3.0$  mm 平底孔进行确定。调试时, 钢管分别移动至内外焊缝 N5 刻槽和焊缝坡口面和/或钝边上  $\Phi 3.0$  mm 平底孔处, 打开扇扫页面, 利用相控阵特征, 根据钢管曲率和壁厚进行检测分区, 分别选取最优的角度检测钢管内外纵向伤和焊缝坡口面上的缺陷, 焊缝纵向 N5 刻槽检测原理如图 6 所示。图 6(a)中探头 1 通过自发自收的方式对焊趾处和焊缝中间部位的 N5 刻槽检测; 探头 2 通过自发自收的方式对另外一焊趾处和焊缝中间部位的 N5 刻槽检

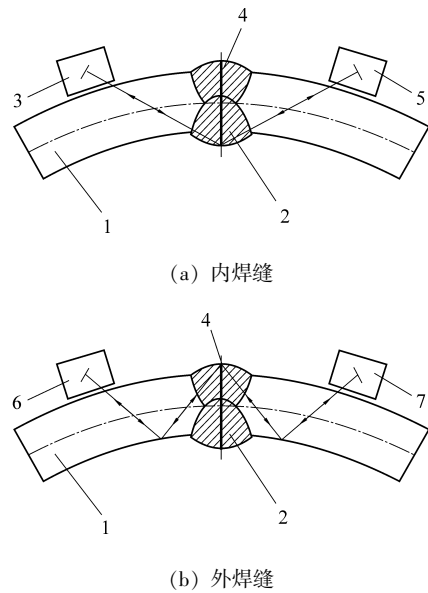


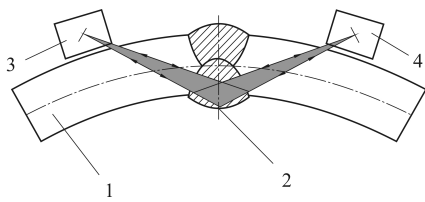
图5 焊缝纵向检测灵敏度校验原理

测。图 6(b)中探头 3 通过自发自收的方式对焊趾处和焊缝中间部位的 N5 刻槽检测; 探头 4 通过自发自收的方式对另外一焊趾处和焊缝中间部位的 N5 刻槽检测。焊缝坡口面平底孔检测原理如图 7 所示, 图 7(a)中探头 1 通过自发自收的方式对内焊缝坡口面和/或钝边上  $\Phi 3$  mm 平底孔检测, 探头 2 通过自发自收的方式对另外一内焊缝坡口面和/或钝边上  $\Phi 3$  mm 平底孔检测; 图 7(b)中探头 3 通过自发自收的方式对外焊缝坡口面和/或钝边上  $\Phi 3$  mm 平底孔检测, 探头 4 通过自发自收的方式对另外一外焊缝坡口面和/或钝边上  $\Phi 3$  mm 平底孔检测。

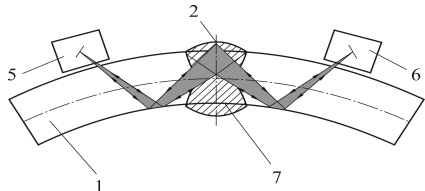
#### 4 钢管焊缝横向伤检测方法

依据技术规格书要求, 对于 X60 及以上钢级焊管焊缝横向伤超声波相控阵检测方法, 应使用“X”或“K”型方式探头布置。壁厚 12 mm 及以下, 1 组探头; 壁厚超过 12 mm, 2 组探头, 其中 1 组检测内表面人工缺陷、另一组检测外表面人工缺陷。对比反射体: 在内外表面上各有 1 个横向 N5 刻槽和  $\Phi 1.6$  mm 竖通孔, 以  $\Phi 1.6$  mm 竖通孔验收为 0 dB (100%FSH) 作为检测灵敏度。这里以 2 组“K”型方式探头布置, 即等腰梯形探头布置方式进行描述。

(1) 钢管焊缝横向伤检测耦合监视。



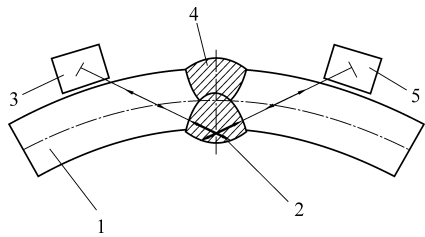
(a) 内焊缝



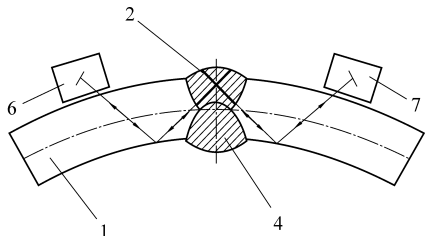
(b) 外焊缝

1 — 钢管 2 — N5 刻槽 3 — 探头 1 4 — 探头 2  
5 — 探头 3 6 — 探头 4 7 — 焊缝

图 6 焊缝纵向 N5 刻槽检测原理



(a) 内焊缝



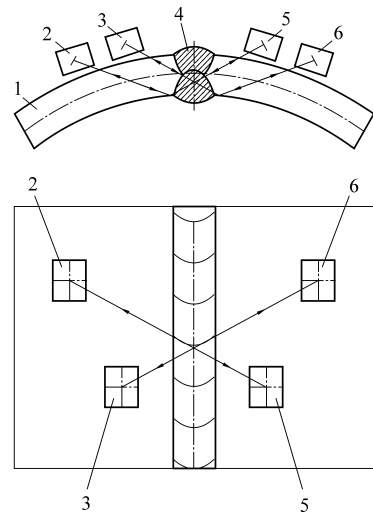
(b) 外焊缝

1 — 钢管 2 — 平底孔 3 — 探头 1 4 — 焊缝  
5 — 探头 2 6 — 探头 3 7 — 探头 4

图 7 焊缝坡口面和/或钝边上平底孔检测原理

调试时，首先在 PLC 操作面板中将相应的 2 组“K”型方式探头打开，将每组探头置于钢管无缺陷位置，调整探头相对位置使每组探头具有良好的耦合，焊缝横向检测耦合原理如图 8 所示。图 8 中探头 1 发射(或接收)和探头 4 接收(或发射)，探头 2 发射(或接收)和探头 3 接收(或发射)的关系实现钢管焊缝的横向检测耦合监视。

(2) 钢管焊缝横向伤检测灵敏度调整。



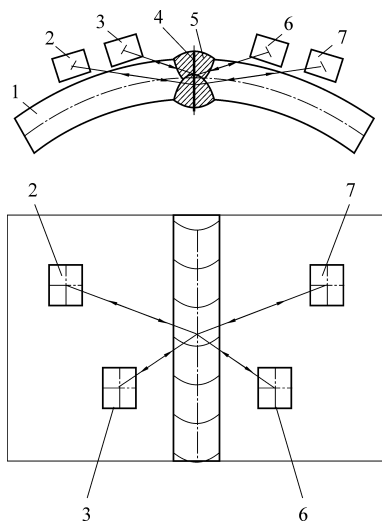
1 — 钢管 2 — 探头 3 3 — 探头 1 4 — 焊缝  
5 — 探头 2 6 — 探头 4

图 8 焊缝横向检测耦合原理

按照技术规格书要求，钢管焊缝各探头检测灵敏度均以  $\Phi 1.6 \text{ mm}$  竖通孔来进行确定，验收为 0 dB (100%FSH)。调试时，将探头移动至对应的  $\Phi 1.6 \text{ mm}$  竖通孔区域，打开扇扫页面，选取合适的角度范围(使用“X”或“K”型方式探头布置，探头角度  $50^\circ \sim 70^\circ$ ；使用“OB”探头检测，探头角度  $45^\circ \pm 3^\circ$ )进行扫查，此时会形成一个在此角度范围内的扇扫图，移动光标，通过  $\Phi 1.6 \text{ mm}$  竖通孔的内外表面选取最优的角度作为最终“K”式检测角度，将反射波高调至 100%FSH 作为检测灵敏度评估，焊缝横向检测灵敏度校验原理如图 9 所示。图 9 中以探头 1 发射(或接收)和探头 2 接收(或发射)的方式对钢管内焊缝横向缺陷检测灵敏度评估，以探头 3 发射(或接收)和探头 4 接收(或发射)的方式对钢管外焊缝横向缺陷检测灵敏度评估。

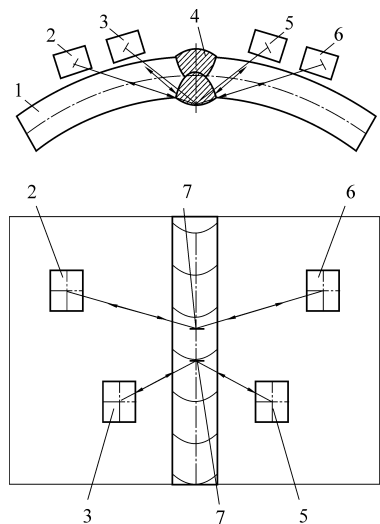
(3) 钢管焊缝横向伤检测范围以及检测能力的确定。

钢管焊缝横向伤检测范围以及检测能力是通过内外焊缝 N5 横向刻槽进行确定。调试时，钢管分别移动至内外焊缝 N5 横向刻槽处打开扇扫页面，利用相控阵特征，根据钢管曲率和壁厚进行检测分区，分别选取最优的角度检测钢管内外横向伤，焊缝横向 N5 刻槽检测原理如图 10 所示。图 10 中以探头 1 发射(或接收)和探头 2 接收(或发射)的方式对钢管内焊缝横向缺陷进行检测，以探头 3 发射(或接收)和探头 4 接收(或发射)的方式对钢管外焊缝横向缺陷进行检测。



1—钢管 2—探头3 3—探头1 4— $\Phi 1.6$  mm 竖通孔  
5—焊缝 6—探头2 7—探头4

图9 焊缝横向检测灵敏度校验原理



1—钢管 2—探头3 3—探头1 4—焊缝  
5—探头2 6—探头4 7—N5 刻槽

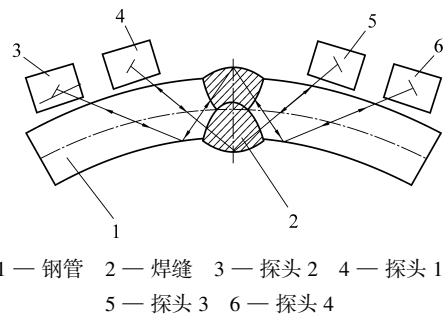
图10 焊缝横向 N5 刻槽检测原理

## 5 串列式检测方法

钢管焊缝串列式超声波相控阵检测方法包括超声波相控阵检测探头和管体外表面通过具有导向性的射流来耦合,检测时以水为耦合剂。超声波相控阵探头与焊缝垂直布置,相对配置的4个相控阵探头分布在焊管焊缝两侧,探头之间的距离可根据钢管的曲率和壁厚进行调整,以控制检测钢管内外焊缝中心不同部位的未焊透缺陷,即包括内外焊缝中心42%~58%壁厚处的所有缺陷。

### (1) 钢管串列式检测耦合监视。

在对比样管调试时,将检测系统 PLC 操作面板中相应的串列检测探头组打开,利用相控阵的聚焦法则将每组串列式探头分为2个检测单元,用于不同深度的人工缺陷(即内外焊缝中心42%~58%壁厚处 $\Phi 3$  mm 平底孔)的检测。将串列式探头置于钢管无缺陷位置处,调整探头相对位置使每组探头具有良好的耦合,焊缝串列式检测耦合原理如图11所示。图11中探头1发射(或接收)、探头3接收(或发射)和探头2发射(或接收)、探头4接收(或发射),即通过探头1、探头2和探头3、探头4相互发射和接收的关系实现钢管内外焊缝中心42%~58%壁厚处 $\Phi 3$  mm 平底孔的检测耦合监视。



1—钢管 2—焊缝 3—探头2 4—探头1  
5—探头3 6—探头4

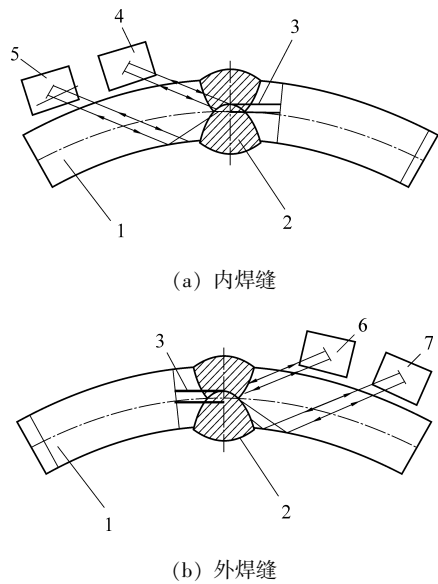
图11 焊缝串列式检测耦合原理

(2) 钢管焊缝串列式检测灵敏度及检测能力的确定。

在对比样管调试时,将探头移动至对应的平底孔位置区域,根据水平位置 $L(L=d\tan\theta)$ 。其中, $d$ 为缺陷埋藏深度, $\theta$ 为探头的入射角),计算出声波发射探头与焊缝的水平距离,移动手轮,将探头移动至对应位置,调整声波接收探头与发射探头的间距数据,打开扇扫页面,选取合适的角度范围(通常选择 $40^\circ\sim 70^\circ$ )进行扫查,此时会形成一个在此角度范围内的扇扫图,移动光标,选取最优的角度作为串列式检测角度<sup>[8-9]</sup>,焊缝中心部位平底孔校验原理如图12所示。图12(a)为探头1分为2个发射单元,探头2分为2个接收单元,分别对焊缝中间42%壁厚 $\Phi 3$  mm 平底孔和58%壁厚 $\Phi 3$  mm 平底孔进行检测;图12(b)为探头3分为2个发射单元,探头4分为2个接收单元,分别对焊缝中间另外一侧42%壁厚 $\Phi 3$  mm 平底孔和58%壁厚 $\Phi 3$  mm 平底孔进行检测。

## 6 结 语

(1) 利用超声波相控阵探头多晶元扇扫功能实



1—钢管 2—焊缝 3—平底孔 4—探头1  
5—探头2 6—探头3 7—探头4

图 12 焊缝中心部位平底孔校验原理

现自动化检测和多种耦合监视功能。

(2) 两组纵向超声波相控阵探头与焊缝垂直布置,通过检测范围的分区划,实现钢管焊缝及焊缝热影响区的内外纵向缺陷全部覆盖,包括焊缝及焊缝坡口面的所有缺陷。

(3) 两组“K”型方式探头布置,即等腰梯形探头布置方式,通过检测范围的分区划,实现钢管焊缝及焊缝热影响区的内外横向缺陷全部覆盖。

(4) 串列式超声波相控阵检测方法可以通过检测范围的分区划,具体是指区划为钢管 42%壁厚和 58%壁厚处,实现钢管内外焊缝中心不同部位的未焊透缺陷全部覆盖,包括内外焊缝中心 42%~58%壁厚处的所有缺陷。

(5) 实现了超声波相控阵检测系统在直缝埋弧焊钢管中的自动校准模式,通过对比样管人工刻伤对应波形位置,可以清晰地看出样管上人工缺陷的位置误差、是否漏检和误报等情况。

### 参考文献

- [1] 高翔, 胡俊伟, 胡才望. 阵列漏磁检测技术在钢管探伤中的应用[J]. 钢管, 2021, 50(1): 75-77.  
GAO Xiang, HU Junwei, HU Caiwang. Application of array flux leakage inspection technique to steel tube flaw

detection[J]. Steel Pipe, 2021, 50(1): 75-77.

- [2] 李清华, 孙旭, 金明哲. 超声波组合检测在钢制大容积无缝气瓶定期检验中的运用[J]. 钢管, 2022, 51(5): 70-74.  
LI Qinghua, SUN Xu, JIN Mingzhe. Application of ultrasonic combined detection to periodic inspection of gas cylinder[J]. Steel Pipe, 2022, 51(5): 70-74.
- [3] 吕育栋, 汪超, 曹华勇, 等. 壳牌新标准中超声波自动探伤探头的选取及布置[J]. 钢管, 2013, 42(5): 77-82.  
LYU Yudong, WANG Chao, CAO Huayong, et al. Selection and arrangement of ultrasonic automatic inspection probe in new shell standard[J]. Steel Pipe, 2013, 42(5): 77-82.
- [4] 陈鹏, 周长忠. HFW 焊管串列式超声波自动探伤技术[J]. 钢管, 2023, 52(4): 80-83.  
CHEN Peng, ZHOU Changzhong. Tandem ultrasonic automatic detection technology for HFW pipe[J]. Steel Pipe, 2023, 52(4): 80-83.
- [5] 周晓锋, 侯强, 高瑞全, 等. 热轧钛合金无缝管超声波检测影响因素分析[J]. 钢管, 2023, 52(4): 75-79.  
ZHOU Xiaofeng, HOU Qiang, GAO Ruiquan, et al. Analysis of factors affecting ultrasonic detection to hot-rolled seamless ti alloy steel pipe[J]. Steel Pipe, 2023, 52(4): 75-79.
- [6] 马立立, 汪超, 杨艳滨, 等. 一种螺旋缝埋弧焊管超声波检测系统研究[J]. 钢管, 2022, 51(4): 73-78.  
MA Lili, WANG Chao, YANG Yanbin, et al. Research on ultrasonic inspection system for spiral submerged arc welded pipe[J]. Steel Pipe, 2022, 51(4): 73-78.
- [7] 林海. 一种超声波探伤追管算法的设计与实现[J]. 钢管, 2023, 52(2): 47-51.  
LIN Hai. Design and realization of a pipe-tracking algorithm for ultrasonic detection[J]. Steel Pipe, 2023, 52(2): 47-51.
- [8] 郑晖, 林树青. 超声检测[M]. 第 2 版. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008.  
ZHENG Hui, LIN Shuqing. Ultrasonic testing[M]. Second edition. Beijing: China Labor and Social Security Publishing House, 2008.
- [9] 郭寓岷. 相控阵超声成像检测[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.  
GUO Yumin. Phased array ultrasound imaging detection [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.

(收稿日期: 2023-05-25; 修定日期: 2024-03-19)