

# 输水钢管对接焊缝超声波检测 技术与质量控制

祁涛, 李海軍

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213)

**摘要:** 焊缝质量是钢管管道工程稳定运行的重要因素, 直接影响到管道的承载能力、使用寿命和安全性。结合某引水钢管工程案例, 通过分析对比五大无损检测技术的适用范围及优缺点等, 最终选用检测效率高且对检测人员无伤害因素的超声波探伤技术; 总结了焊缝检测前仪器设备及焊缝检测面的准备工作、超声波探伤的操作步骤、焊缝缺陷的判定及质量控制要点等, 所取得的经验可为类似工程应用时借鉴。

**关键词:** 钢管焊缝; 超声波探伤; 焊缝检测面; 缺陷判定

**中图分类号:** TV52; TV697.4+1; TV68

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1001-2184(2024)05-0098-05

## Ultrasonic Testing Technology and Quality Control for Butt Welds of Water Supply Steel Pipes

QI Tao, LI Haijun

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610213)

**Abstract:** The quality of welds is an important factor for the stable operation of steel pipe pipeline projects, which directly affects the bearing capacity, service life, and safety of the pipeline. Based on the case of water supply steel pipe, by analyzing and comparing the applicability, advantages and disadvantages of the five major non-destructive testing technologies, the ultrasonic testing technology with high detection efficiency and no harm to personnel is finally selected; At the same time, the preparation of instruments and equipment before welding seam detection, the preparation of welding seam detection surface, the operation steps of ultrasonic flaw detection, the determination of weld defects and key points of quality control were summarized, providing reference for similar engineering applications.

**Key words:** Steel pipe welds; Ultrasonic testing; Weld inspection surface; Defect determination

### 1 概述

随着水资源供需矛盾的逐渐加剧, 引水工程建设全面提速。输水钢管因其具有防腐性能优、卫生性能好、使用寿命长且安装施工方便等优点已广泛应用于城市供水工程。输水钢管的施工一般采用在工厂内将钢管加工成一定长度的管段, 运输至现场通过焊接方式进行连接, 因此, 钢管对接焊缝的质量成为保证输水管道稳定运行的重要因素之一。工程施工阶段, 钢管焊接完成后应及时按照设计要求进行焊缝检测以确保焊缝质量合格。

某城市引水工程以凉山州冕宁县惠安乡大桥水库发电站尾水渠为取水口, 通过 90 km 长的输水管道引水至西昌市第三水厂, 沿途在九个重要

乡镇设置分水口。输水管道采用涂塑复合钢管, 管径为 DN1600~DN1000 mm, 供水压力为 1.6~2.5 MPa, 钢管壁厚 12~25 mm。该工程线路长、沿线经过当地村庄、农田等, 其管道的安全稳定运行对于保障当地居民的生产生活安全具有重要的意义。因此, 输水钢管焊接的质量成为该工程质量控制的重点之一, 设计要求对 100% 的焊缝进行无损检测且焊缝质量要求全部合格。

### 2 焊缝检测技术之比选

在不破坏工件或原材料工作条件的情况下, 检查被测零件表面和零件质量的一种检测方法被称为无损检测, 其是检验钢管、管材焊缝质量的有效方法, 主要包括超声波检测、磁粉检测、射线检测、渗透检测和涡流检测<sup>[1]</sup>。射线探伤和超声波

收稿日期: 2024-06-30

探伤一般用于焊接焊缝缺陷的检查;而渗透检测、磁粉检测和涡流探伤检测则一般用于钢材、钢管、管材焊接焊缝表面的检查。因此,选择合适的检测方法需要根据不同的焊接材料和结构形状,结合每种检测方法的优点、缺点和局限性进行选择。不同材质焊接焊缝探伤的适用方法见表1。

表 1 不同材质焊接焊缝探伤的适用方法表

| 检查对象 | 检测方法 |       |      |      |      |      |
|------|------|-------|------|------|------|------|
|      | 检查内容 | 超声波探伤 | 射线探伤 | 磁粉检测 | 渗透检测 | 涡流检测 |
| 铁素体  | 焊接缺陷 | √     | √    | ×    | ×    | ×    |
|      | 表面缺陷 | *     | *    | √    | √    | *    |
| 奥氏体  | 焊接缺陷 | *     | √    | ×    | ×    | ×    |
|      | 表面缺陷 | *     | *    | ×    | √    | *    |
| 铝合金  | 焊接缺陷 | √     | √    | ×    | ×    | ×    |
|      | 表面缺陷 | *     | *    | ×    | √    | *    |
| 其他金属 | 焊接缺陷 | *     | √    | ×    | ×    | ×    |
|      | 表面缺陷 | *     | *    | ×    | √    | *    |

注:√:非常合适;\*:有附加条件的合适;×:不合适。

该工程的输水钢管为热轧卷板制作的涂塑复合钢管。由表1可知:超声波探伤及射线探伤均适用于该工程的钢管焊缝质量检测。而超声波探伤及射线探伤两种检测方法各有其优点和局限性,分别为<sup>[2]</sup>:

(1)射线检测。利用电磁波穿透工件进行检测的方法被称为射线检测。根据焊缝完好部分和缺陷部分的投射量存在的差异进行检测,其差异程度与完好部分和缺陷部分的射线强度、缺陷大小、材质和透射方向有关,进而形成缺陷图像。射线无损探伤检测具有以下主要特征:①基本不受焊接焊缝厚度的影响;②在射线形成的影像上,其缺陷部分与完好部分的黑度颜色有差异,从而形成缺陷部位及形状的平面投影图片,一般无法观测到缺陷深度;③辐射对操作人员具有一定的伤害;④要求钢管焊缝的两侧相互靠近,且检验的时间较长、检验的成本较高。

(2)超声波检测。通过弹性波在缺陷处的衍射或反射的声波提取缺陷信号的检测方法被称为超声波检测,其发射的超声波信号强度与探伤声波频率和波型有关,缺陷的大小和方向与其表面状态和完好及缺陷部位的材料有关。超声波无损探伤具有以下主要特点:①当钢材、钢管的厚度小于8 mm时,需要采用其他特殊的焊缝检验方法;②显示屏上出现的缺陷声波的振幅和位置代表缺陷的大小和深度,一般难以测量到缺陷的真实尺寸,只能用衍射波法测量缺

陷的高度;③对于操作人员的身体健康无伤害;④焊缝检测时只需要靠近焊缝的一侧,其成本相对较低,检查时间较短。

综上所述,鉴于该工程输水管道的壁厚为12~25 mm,同时,为了提高焊缝检测的效率,保障操作人员的职业健康,项目部最终决定管道焊缝的检测采用超声波探伤。

3 焊缝超声波检测技术的实施

3.1 检测等级的确定

该工程的焊缝质量等级为一级焊缝,检验等级为B级,检验比例为100%。

3.2 检测前的准备工作

(1)超声波检测仪器的准备

①探头的选择。该工程使用的钢管壁厚为12~25 mm,焊缝超声波检测选用斜探头。斜探头实物见图1。



图1 斜探头实物图

焊缝的焊接采用一次射线反射法,斜探头标称频率、折射角(K值)按照表2中的规定进行参数的选取<sup>[3]</sup>。斜探头折射角(K值)和标称频率见表2。

| 表 2 斜探头折射角(K 值)和标称频率表 |           |         |              |
|-----------------------|-----------|---------|--------------|
| 工件厚度 <i>t</i><br>/mm  | 折射角<br>/° | K 值     | 标称频率<br>/MHz |
| 6~25                  | 63~72     | 2.0~3.0 | 4~5          |

② 仪器的调节。斜探头入射点的测定采用 CSK—Ⅰ A 试块,折射角(K 值)的测定采用 CSK—Ⅱ A 试块;根据被检工件的厚度,仪器基线的调整选择 CSK—Ⅱ A 试块。

③ 距离-波幅曲线的绘制。按检测时采用斜探头和检测仪器在检测试块上得到的实测数据进行绘制,所绘制的曲线图包括:判废线(RL)、评定线(EL)、定量线(SL)。评定线、定量线、判废线在曲线图上从下向上排列,分别分割出Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区,其中Ⅰ区包括评定线,Ⅱ区包括定量线。距

离-波幅曲线见图 2。

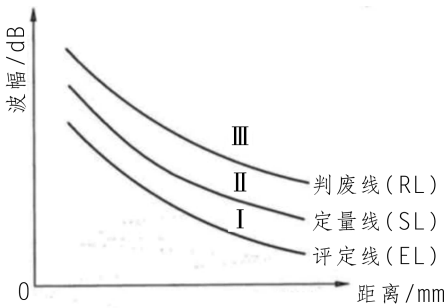


图 2 距离-波幅曲线图

④ 距离-波幅曲线的灵敏度选择。由 CSK—Ⅱ A 试块制作的距离-波幅曲线灵敏度适用于该工程。斜探头射线检测距离-波幅曲线的灵敏度见表 3。

| 表 3 斜探头射线检测距离-波幅曲线的灵敏度表 |          |             |             |            |       |
|-------------------------|----------|-------------|-------------|------------|-------|
| 试块型式                    | 工件厚度 /mm | 评定线         | 定量线         | 判废线        | 备注    |
| CSK—Ⅱ A                 | 12~25    | A2×40—18 dB | A2×40—12 dB | A2×40—4 dB | 斜探头检测 |

评定线的灵敏度应高于扫查灵敏度。

(2)耦合剂的选取  
焊缝超声波检测时需要在焊缝表面均匀涂刷耦合剂,要求耦合剂在不损伤检测工件表面的前提下具有良好的透声性。具备该特性的材料一般为:化学浆糊、机油、甘油等。检测时应提前准备好耦合剂,该工程使用的耦合剂为机油。

(3)焊缝检测面的准备  
①焊缝检测前,为了减少对缺陷的判断与声波耦合的影响,需要将焊缝检测面的焊渣飞溅、铁屑、油漆、油垢及其他异物清理干净。焊缝检测面的清理应覆盖整个探头移动区域。探头移动区域见图 3。

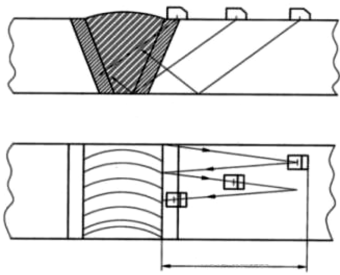


图 3 探头移动区域示意图

探头移动区域的宽度应大于或等于  $1.25 P$ , 其中  $P$  参照下列公式计算:

$$P=2Kt=2t\times\tan\beta$$

式中: $P$  为跨距,mm; $t$  为工件厚度,mm; $K$  为探

头折射角的正切值,mm; $\beta$  为探头折射角,°。

代入  $K=2.5$ 、 $t=25$  mm,计算得探头移动区域的宽度为 78.13 mm。该工程取探头移动区域的宽度为 100 mm。

②平整的检测面是检测的前提条件,即检测面表面的粗糙度  $R\leq 25\text{ }\mu\text{m}$ ,检测部位的平面、仪器斜探头的楔块底部平面或保护膜间的空隙应 $\leq 0.5$  mm。

③检测前,需要对钢管焊缝部位进行打磨,使焊缝与钢管表面的高度保持一致。

(4)焊缝外观的检验  
采用超声波探伤检测前,首先对焊缝的外观进行自检,然后利用焊接检验尺等测量工具进行检查。焊缝外观检验质量的控制要求为钢管焊缝与管体应平滑过渡、无焊接缺陷。

3.3 超声波探伤检测

超声波在构件内部传播的过程中遇到不同材质、缺陷时会产生不同的反射信号,其超声波检测步骤为:

- (1)在焊缝检测区均匀涂刷耦合剂;
- (2)使用探头在焊缝检测区进行扫查,扫查方式如下<sup>[4]</sup>:

①焊接焊缝纵向缺陷检测时,需要保持探头、焊缝中心线、检测面三者相互垂直;对于波浪锯齿路径检测时,其焊缝接头的截面需要全部在探头

前后移动的范围。在保持斜探头垂直焊缝作波浪锯齿路径检测时,还需要沿着路径进行左右 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的转动。探头波浪锯齿形扫查情况见图4。

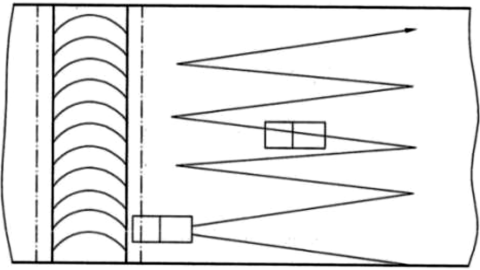


图4 探头波浪锯齿形扫查示意图

②可采用转角、环绕、左右、前后等四种扫查方式观察缺陷部位实时反射回来的声波,并分析判别真实缺陷波形信号或伪缺陷波形信息,以进一步确定焊缝缺陷的形状、位置、方向。探头的四种基本扫查方法见图5。

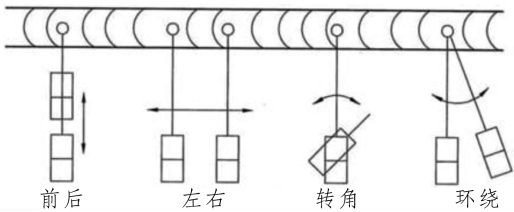


图5 探头的四种基本扫查方法示意图

③焊缝横向缺陷检测时,可以在焊接焊缝两侧边缘使斜探头和焊接焊缝中心线的夹角 $\leq 10^{\circ}$ ,并向两个方向进行平行扫查;如焊缝余高已经打磨平整,则仪器探头应对热影响区上、焊接接头两个方向进行平行扫查。斜平行扫查(左侧)与平行扫查(右侧)情况见图6。

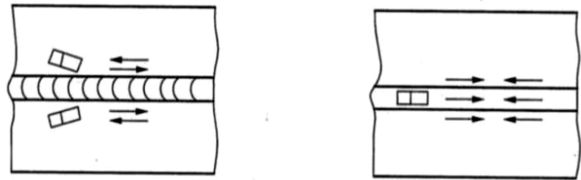


图6 斜平行扫查(左侧)与平行扫查(右侧)示意图

(3)缺陷的判定

在探头扫查的同时观察检测仪器屏幕上的回波图像,判断其是否存在缺陷。仪器实际灵敏度设置情况见图7。

①若仪器屏幕上的回波在Ⅰ区和Ⅱ区,移动或适当转动探头找到该反射体的最高回波图像,观察仪器中显示的反射体深度并量测反射体距探

头位置的距离,若反射体距探头的位置及深度均在焊缝内,则判定此处为焊接缺陷,反之则不是。

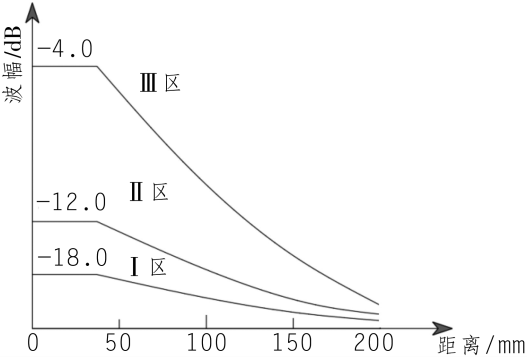


图7 仪器实际灵敏度设置示意图

②若仪器屏幕上的回波在Ⅲ区,则直接判定此处为缺陷。

(4)缺陷的定量

对于波幅大于或等于评定线的缺陷,应确定缺陷的位置、波幅和指示长度。

①缺陷的波幅:随着检测时不同位置的波幅不一样,存在缺陷部位的声波幅度对应着最大的反射声波幅度。

②缺陷的位置:通过检测时最大声波幅度变化的位置可以确定其为缺陷的位置。

③缺陷的指示长度:当缺陷反射波只有一个高点且位于Ⅰ区或Ⅱ区以上时,用 $-6\text{ dB}$ 法测量其指示长度;当缺陷反射波峰值起伏变化、有多个高点且均位于Ⅱ区或Ⅰ区以上时,应以端点 $-6\text{ dB}$ 法测量其指示长度;当缺陷最大反射波幅位于Ⅰ区时,可以将探头左右移动,使波幅降到评定线,使用评定线绝对灵敏度法测量缺陷的指示长度<sup>[5]</sup>。

(5)缺陷的评定

①当检测声波幅度高于评定线时,检查焊缝处是否存在未熔合、裂纹、未焊透等类型的缺陷;如不能确定时,应结合多种检测情况或方法综合比较后进行判断。

②当出现两个互相临近且平行的缺陷时,其两缺陷垂直方向的间距小于 $5\text{ mm}$ ,且平行方向的长度差小于较短的缺陷长度,对于这种情况,可以将其视为一条缺陷进行处理,指示长度以两缺陷长度之和计算(间距计入)。

③对照对接接头超声检测质量分级表,查看焊缝缺陷是否在允许的范围内,并将不在缺陷允许长度内的缺陷做好记录,在焊缝旁的涂塑钢管

上做好标记,以便后续对缺陷进行处理和复检。

钢管焊接纵向、环向对接焊缝超声波无损检测的质量级别见表 4。

表 4 钢管焊接纵向、环向对接焊缝超声波无损检测质量级别表

| 焊接接头<br>等级 | 焊接焊缝内部缺陷 |                           | 环向焊接焊缝接头单面焊根部未焊透缺陷 |                        |
|------------|----------|---------------------------|--------------------|------------------------|
|            | 反射波幅所在区域 | 单个缺陷指示长度允许值 /mm           | 指示长度允许值 /mm        | 累计长度允许值 /mm            |
| I          | I        | $\leq 40$                 | $\leq t/3$ ,最小可为 8 | 长度小于等于焊缝周长的 10%,且小于 30 |
|            | II       | $\leq t/3$ ,最小可为 8,最大为 30 |                    |                        |

注:(1)当对接接头的钢管厚度存在差异时,采用厚度较薄侧的厚度为检测值;(2)在对接焊缝两侧 10 mm 范围内同时存在条状缺陷和未焊透缺陷时,应评定为Ⅲ级;(3)当该级别单个指示长度允许值大于缺陷允许值累计长度时,以单个缺陷指示长度允许值为准;(4) $t$ 为管材的壁厚,mm。

(1)超声波探伤检测前,必须让焊缝自然冷却至常温(包括复检)。该工程的焊缝超声波检测均在施焊结束 24 h 后进行;

(2)超声波探伤检测前,对其检测面必须进行清除铁屑、油漆、油垢、焊渣飞溅及其他异物的工作,以免影响到声波耦合和对缺陷的判断;

(3)检测面的清理范围一定要覆盖整个探头移动区域,以方便探头扫查时能够正常移动;

(4)进行超声波无损检测时必须覆盖全部检测区,因此,探头移动区域的宽度必须覆盖全部检测区;

(5)超声波探伤检测应在焊缝外观检查合格后进行;

(6)由于不同的环境温度会影响声波在材料中的传播速度、影响检测结果的准确性,故检测过程中应保持环境温度稳定;

(7)超声波检测的前提:要求仪器及其探头无故障、性能正常;

(8)在实际检测时,耦合剂的选择应与仪器调校时所用的耦合剂保持一致;

(9)对焊缝的超声波检测结果的准确性存在质疑时,应采用射线探伤检测对超声波检测结果进行复核。

5 结 语

焊缝质量是钢管稳定运行的重要因素,其直接影响到管道的承载能力、使用寿命和安全性,在

工程施工中必须重视焊缝质量的检测工作,准确判定焊缝是否合格。检验钢管焊缝质量的有效方法是焊缝无损探伤检测。在工程实践中,应根据管道的材质、壁厚等因素综合比选合适的焊缝检测技术;在使用超声波探伤检测技术时,应做好仪器设备的准备工作,包括探头的选择、仪器的调节、距离-波幅曲线的绘制及灵敏度选择,同时应选择一致的耦合剂,提前对焊缝检测面进行处理至合格,并按照正确的操作规程进行探伤检测及缺陷判定,准确评定焊缝质量以确保钢管焊接质量满足相关要求。

参考文献:

[1] 陈振刚. 浅析磁粉探伤在检测焊接质量上的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版),2016,6(11): 5649-649.

[2] 张书瑄. 超声波探伤 304L 不锈钢焊接缺陷研究[D]. 西安: 长安大学,2017.

[3] 张义磊,张彬. 锅炉接管角焊缝超声波检测工艺的探讨[J]. 化工装备技术,2019,40(6):34-36.

[4] 张佳银. 手动常规超声法检测焊接接头横向缺陷可行性关键因素的探讨[C]. 2017 远东无损检测新技术论坛 论文集. 2017:173-180.

[5] 冯华平. 对 NB/T 47013. 3—2015 标准中焊接接头超声检测内容的探讨[J]. 无损检测,2018,40(11):80-84.

作者简介:

祁 涛(1988-),男,安徽宿州人,副高级工程师,学士,从事水利水电与市政工程施工技术与管理工;

李海军(1997-),男,四川南充人,助理工程师,从事水利水电与市政工程施工技术与管理工。 (编辑:李燕辉)

作者简介:

程蔚蕊(1997-),男,四川南充人,技术员,从事市政工程施工技术与质量管理工作;

贺燕平(1996-),女,陕西铜川人,助理工程师,学士,从事市政工程施工技术与质量管理工作;

赵家翔(1997-),男,甘肃天水人,助理工程师,从事市政工程施工技术与质量管理工作。 (编辑:李燕辉)

[3] 王洪胜,冯欢欢,丁相吉. 钢结构建筑防腐保护工程的质量控制途径[J]. 工程建筑与设计,2024,72(2):203-205.

[4] 杨晨. 钢结构桥梁防腐涂层病害原因分析及修复方案优选分析[J]. 全面腐蚀控制,2020,34(1):83-84.

[5] 色吉拉呼. 钢结构建筑防腐保护工程的质量控制[J]. 四川建材. 2015,41(3):230,232.