

ERW 焊管的超声波检测

聂向晖^{1,2}, 杨 龙¹, 张鸿博^{1,2}, 李记科^{1,2}, 李云龙^{1,2}

(1. 中国石油天然气集团公司 管材研究所, 西安 710065;

2. 北京隆盛泰科石油管科技有限公司, 北京 100101)

摘 要: 简要介绍了 ERW 焊管生产过程中超声波检测的工艺过程及特点, 从折射角、声束宽度和检测频率三方面对 ERW 焊缝超声波检测工艺参数的选择进行了讨论。在 ERW 焊管的超声波检测中, 焊管中横波折射角的下限是 33.2° , 其上限范围随焊管内外径比 r/R 的变化而变化, r/R 数值越大, 其范围也就越大; 45° 折射横波对于焊缝及热影响区表面开口缺陷具有较高的检测灵敏度, 但是为了兼顾焊缝内部的径向面积型缺陷的检测, 还应采用大折射角的横波声束进行扫查; 在检测中要根据横波折射角和钢管直径综合考虑入射声束宽度, 既要保证声束上边缘不在焊管中激发出表面波, 又要避免焊管中折射纵波的出现。

关键词: ERW 焊管; 超声波检测; 折射角; 声束宽度

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2011)02-0043-04

Ultrasonic Testing of the Electric Resistance Welded Pipe

NIE Xiang-Hui^{1,2}, YANG Long¹, ZHANG Hong-Bo^{1,2}, LI Ji-ke^{1,2}, LI Yun-Long^{1,2}

(1. Tubular Goods Research Center of China National Petroleum Corporation, Xi'an 710065 China;

2. Beijing Longshine Oil Tublar Technology Co Ltd, Beijing 100101, China)

Abstract: Process characteristics of the ultrasonic testing in the electric resistance welded pipe production were introduced in this paper. The selection of technological parameters was discussed from three respects, such as refraction angle, width of the acoustic beam and ultrasonic frequency. In the ultrasonic testing of the ERW seam, the lower limit of the refraction angle is 33.2° , and the upper limit increases with the increment of the ratio between inter-diameter and outer-diameter. The refraction shear wave with the angle of 45° can detect the surface-breaking defects effectively. To detect the inner area type defects, shear wave with large angle should be adopted. In practice work, the width of the incident beam is determined by the refraction angle and the pipe diameter to avoid the generation of the surface wave and the refraction longitudinal wave.

Keywords: Electric resistance welded pipe; Ultrasonic testing; Refraction angle; Beam width

ERW 焊管是利用高频电流的集肤效应和临近效应, 将管坯边缘迅速加热到焊接温度后进行挤压、焊接而制成。相对于无缝钢管, ERW 焊管具有尺寸精度高、价格低和生产效率高等优点, 并且其晶粒度和组织的致密程度要优于无缝钢管; 与同规格的埋弧焊管相比, ERW 焊管生产速度快, 不存在焊缝部位的防腐层局部减薄现象^[1-3]。其使用领域涉及

到石油钻采中所用的套管, 海洋石油工业中的海底油气输送管, 干线及城市管网用油气输送管和配气管等^[4]。

虽然国内引进 ERW 焊管生产技术较早, 但在消化、吸收和创新等方面还存在严重不足。与发达国家相比, 我国的 ERW 焊管质量还有一定的差距, 其在国内长输管线上的使用也受到了一定的限制^[5-7]。ERW 焊管的焊接质量是影响其使用性能的主要因素, 在 ERW 焊管的试压及使用过程中的开裂和爆管等事件多是由于焊接缺陷造成的, 因而

收稿日期: 2010-03-26

作者简介: 聂向晖(1972—), 男, 工程师, 博士。

提高 ERW 焊管的检验水平,提高焊接缺陷检出率,对于保证 ERW 焊管质量,确保 ERW 焊管管线的安全运行具有重要意义。

ERW 焊管中可能出现多种焊接缺陷,这些缺陷有的来自于母材,有的产生于焊接过程^[8-9]。不同缺陷对焊缝质量的影响不同,裂纹和未融合等面积型缺陷在受力条件下容易出现应力集中,是造成焊缝低应力脆性断裂的主要原因;而气孔和夹渣等体积型缺陷,虽然其开裂敏感性要小于面积型缺陷,但是减小了焊缝的有效截面积,降低了焊缝强度,在外力作用下,这些缺陷处也往往会成为裂纹源,最终导致焊缝的开裂。

1 ERW 焊管生产过程中的超声波检验

超声波检测是目前 ERW 焊管生产过程中的主要无损检测手段,其主要应用领域包括:① 钢板超声波在线检测。② ERW 焊接、内外毛刺清除后的焊缝超声波在线检测。③ ERW 焊缝的离线检测。④ ERW 焊管管端的超声波检测。

1.1 钢板超声波在线检测

钢板超声波在线检测一般是采用双晶或多晶探头,采用水膜法或局部水浸法耦合,其主要目的是检测钢板内平行于钢板表面的分层类缺陷。在扫查方式上主要有两种:一是沿轧制方向的平行线扫查;二是钢板沿轧向直线运动、探头垂直于钢板运动方向作往复运动,构成“Z”字形扫查。由于钢板边缘在随后的 ERW 焊接中形成焊缝,因此在钢板的超声波检测中,该处缺陷的检测尤为重要,相关的标准和规范中都要求对钢板边缘进行 100% 的扫查,在实际工作中一般采用在钢板边缘增加探头数量的方法来保证。

1.2 焊缝超声波在线检测

ERW 焊缝超声波在线检测是在焊接、内外毛刺清除后进行的,其主要包括两部分内容:一是利用 A 扫描或 B 扫描的方式检测内外毛刺的刮除效果。相对于 A 扫描,B 扫描可以实时显示清除内毛刺后的焊缝内壁形貌,图形显示更直观(图 1);二是纵波倾斜入射,利用其在焊管内折射产生的横波检测焊接缺陷。由于此时焊缝温度较高,因而在线检测一般采用高温探头,利用局部水浸法来进行。

1.3 焊缝超声波离线检测和管端检测

ERW 焊缝的离线超声波检测一般是在水压试验和倒棱后进行,主要用于检测焊缝及热影响区内



图 1 焊缝及热影响区 B 扫描图像

的纵向缺陷。为了提高检测效率,一般采用自动检测。由于自动检测中管端盲区的影响,在其后一般还要增加焊缝的人工超声波扫查。管端检测的内容主要包括管端焊缝、管端母材分层类缺陷及轴向和周向缺陷的检测,分层缺陷的检测一般采用分割式探头,焊缝和母材中的轴向和周向缺陷多采用斜探头扫查的方法。

2 ERW 焊缝超声波检测工艺参数的选择

ERW 焊缝的超声波检测主要包括自动检测和人工检测两种方法。目前 ERW 焊缝的自动检测主要采用轮式探头检测和局部水浸法检测两种形式^[10]。自动检测具有检测效率高、速度快的优点,但是不利于缺陷的精确定位及定性、定量分析;相比较而言,人工检测的灵活性要更高一些,不仅可以对缺陷进行精确的定位,还可以通过回波特征及动态波形来进行缺陷的定性及定量分析。对于自动超声波检测出的缺陷,一般使用人工的方法来进一步确认。ERW 焊缝的超声波检测需要考虑的工艺参数包括折射角、声束宽度和检测频率等。

2.1 折射角的选择

ERW 焊缝的超声波检测一般采用纵波倾斜入射,在工件和焊缝中通过波型转换生成横波来实现检测,其两个基本条件是,① 在母材和焊缝中激发出纯横波。② 横波声束扫查到钢管内壁(图 2)。

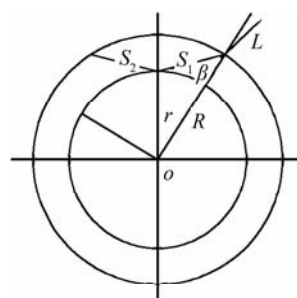


图 2 横波检测 ERW 焊缝示意图

由反射和折射定律可知,在焊管中激发出纯横波的条件是:

$$\sin \beta \geq \frac{C_{S2}}{C_{L2}} \quad (1)$$

式中 β 为横波折射角; C_{S2} 为钢中横波声速,其值为 3 230 m/s; C_{L2} 为钢中纵波声速,其值为 5 900 m/s。

带入相关数据,经计算可知,当 $\beta \geq 33.2^\circ$ 时,在焊管内激发的是纯横波。

由图 2 可以看出,横波声轴线扫查到焊管内壁的条件是:

$$\sin \beta \leq \frac{r}{R} \quad (2)$$

式中 r 和 R 分别为焊管的内半径和外半径。所以在焊管中激发出纯横波,并且扫查到焊管内壁的条件是:

$$33.2^\circ \leq \beta \leq \arcsin \frac{r}{R} \quad (3)$$

即焊管中横波折射角的下限为固定值 33.2° ;而其上限随 r/R 的变化而变化, r/R 数值越大,其范围也就越大。

根据钢/空气界面的端角反射率图谱可知:横波入射时,当其入射角在 $35^\circ \sim 55^\circ$ 之间时,横波全反射,端角反射率达 100%。在现场检测中,焊管内的声束折射角一般采用 45° (K1),采用这种折射角的优势是:在检测过程中不容易激发出表面波,干扰信号小;对于焊缝及热影响区的裂纹、表面未熔合、错边和内凹等表面开口缺陷敏感^[11]。

但是对于 ERW 焊管来说,其壁厚一般较薄,薄壁对接焊缝中的面积型缺陷与母材表面的夹角较大,因而一般的标准中多规定对于薄壁对接焊缝采用大折射角横波进行检测,如 GB/T 11345 标准《钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果分级》中对于母材板厚 ≤ 25 mm 的焊缝,推荐使用的折射角为 70° (K2.5, K2.0); SY 4065 标准中对母材壁厚为 5~8 mm 的焊缝,推荐的折射角为 $71.5^\circ \sim 68.2^\circ$ (K3~K2.5),母材壁厚 $> 8 \sim 30$ mm 的焊缝,推荐的折射角为 $68.2^\circ \sim 56.3^\circ$ (K2.5~K1.5); JB/T 4730.3 标准《承压设备无损检测 第 3 部分 超声检测》中对母材壁厚 6~30 mm 的焊缝,推荐的折射角为 $72^\circ \sim 60^\circ$ (K3.0~K2.0) 等。这些标准中对于薄壁对接焊缝推荐使用大折射角横波检测的目的也是为了增大声束轴线与缺陷表面间的夹角,增加声压反射率,提高指向性不好的缺陷的检出率。

对于 ERW 焊缝,其熔合部分宽度较窄,焊接缺陷多为面积型缺陷,且与母材表面基本垂直。当采用小折射角横波扫查时,由于缺陷的有效声束反射面积小,声压反射率低,往往容易漏检。因而在实际检测工作中,不应单一采用 45° (K1) 横波进行扫查。为了兼顾焊缝内部的径向面积型缺陷的检测,还应采用大折射角的横波进行扫查。

2.2 声束宽度(晶片尺寸)的选择

声束宽度或晶片尺寸的选择要综合考虑横波检测过程中表面波和纵波的影响、声束发散的影响以及检测过程中可能激发出的板波的影响。

如图 3 所示,在 ERW 焊管的超声波检测中,声束倾斜入射至水/钢或有机玻璃/钢界面时,在声束或晶片的边缘与中心处的入射角是不同的,其中声束上边缘的入射角 α_1 大于声轴线的入射角 α ,而下边缘的入射角 $\alpha_2 < \alpha$ 。

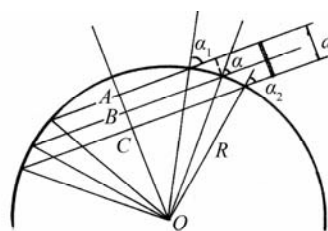


图 3 声束入射角示意图

α_1 和 α_2 的表达式分别为:

$$\alpha_1 = \arcsin \left(\sin \alpha + \frac{d}{D} \right) \quad (4)$$

$$\alpha_2 = \arcsin \left(\sin \alpha - \frac{d}{D} \right) \quad (5)$$

式中 d 为入射纵波声束或晶片在垂直于焊管轴线方向上的宽度; D 为焊管外径。从上面的公式可以看出,当超声波声轴线的入射角一定时,其声束上边缘的入射角 α_1 随 d/D 的增大而增加,当其超过第二临界角 α_{II} 时,就会在焊管表面激发出表面波,对检测结果产生干扰;声束下边缘的入射角 α_2 随 d/D 的增大而减小,当其小于第一临界角 α_I 时,就会在焊管内激发出纵波,同样会对检测结果产生干扰。

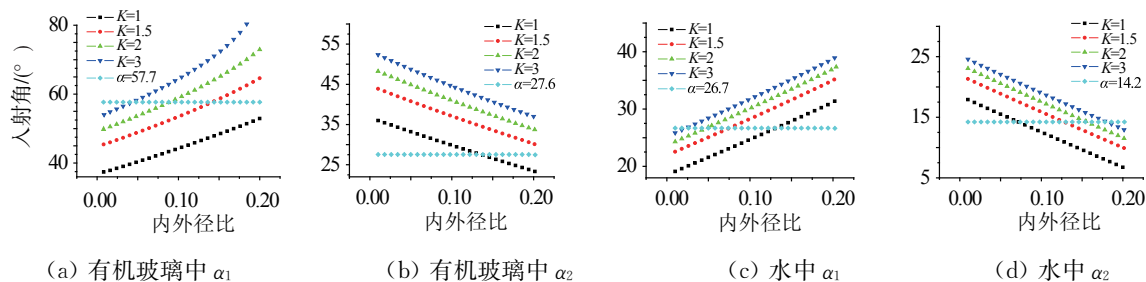
目前国内常用斜探头的 K 值主要为 1, 1.5, 2 和 3, 其对应的钢中折射角、有机玻璃、水中的入射角及有机玻璃和水中的第一、第二临界角等相关数据见表 1。

表 1 不同 K 值所对应的相关参数

K 值	钢中折射角/ $^\circ$	有机玻璃中入射角/ $^\circ$	水中入射角/ $^\circ$	水中临界角/ $^\circ$		有机玻璃中临界角/ $^\circ$	
				α_I	α_{II}	α_I	α_{II}
1	45	36.7	18.5				
1.5	56.3	44.7	21.9	14.2	26.7	27.6	57.7
2	63.4	49.1	23.7				
3	71.6	53.3	25.2				

注:1) 水中 $C_L=1450$ m/s;有机玻璃中 $C_L=2730$ m/s。

利用式(4)和(5)可以得到不同折射角时,水中 and 有机玻璃中 α_1 和 α_2 与 d/D 之间的关系见图 4。

图4 有机玻璃和水中的 α_1 和 α_2

图中当 $\alpha_1 > \alpha_{II}$ (如 57.7° 和 26.7°) 时, 会在焊管中激发出表面波; 当 $\alpha_2 < \alpha_I$ (如 27.6° 和 14.2°) 时, 钢中不仅有折射横波, 还有折射纵波。从图中还可以看出, 钢中折射角越大, 在焊管中越容易激发出表面波; 钢中折射角越小, 在焊管中越容易产生纵波。对于相同的折射角, 在有机玻璃/钢界面激发出纯横波的 d/D 的范围要比水/钢界面大得多。在实际检测中要根据不同折射角的要求, 选择合适的 d/D , 以确保在钢中产生纯横波。

对于局部水浸法检测, 因为超声波近场区大部分落在水柱中, 因而可不考虑近场区的影响, 而对于斜探头接触法检测, 则应考虑近场长度和扩散角对检测结果的影响。对于一定的检测频率和检测对象, 晶片尺寸越大, 近场长度也越大, 扩散角越小, 较小的扩散角有利于声束的聚集, 提高缺陷的检出率。此外, 对薄壁 ERW 钢管, 若晶片尺寸过大, 粗大的超声波会在焊管薄壁中反射并形成叠加干涉, 从而可能激发出某种模式的兰姆波, 造成较大回波干扰。

2.3 检测频率的选择

超声波检测的频率范围较宽, 一般为 $0.5 \sim 10$ MHz, 频率的选择主要应考虑以下几个因素:

(1) 超声波检测的灵敏度约为 $\lambda/2$, 提高频率有利于发现更小缺陷。此外, 频率越高, 脉冲宽度越小, 分辨力也越高。

(2) 频率高, 波长短、半扩散角小、声束指向性好、能量集中, 有利于发现缺陷并对缺陷定位。但是对于相同的晶片尺寸, 频率越高, 近场区越大, 对检测越不利。

(3) 频率增加, 超声波的散射和吸收衰减急剧增加, 对检测不利。

在检测中要综合考虑各方面的因素, 合理选择检测频率。对于 ERW 焊管, 其母材一般为热轧板卷, 晶粒比较细小。经感应加热、挤压成型后的焊缝熔合区和热影响区的宽度较窄, 且其晶粒度基本与母材相当。在实际工作中, 为了获得较高的分辨力,

应在保证检测灵敏度的前提下尽可能选用较高的频率, 一般为 $2.5 \sim 5$ MHz 之间。

3 参考试块

参考试块是 ERW 焊缝超声波检测灵敏度的确定依据, API Spec 5L《管线管规范》和 GB/T 9711《石油天然气工业输送钢管交货技术条件》标准对于钢管焊缝的超声波检测, 要求使用带有 N10 刻槽或 $\phi 3.2$ mm 竖通孔的对比试块, 以人工反射体回波的 100% 作为缺陷判定基准。实际工作中一般采用如图 5 所示试块。

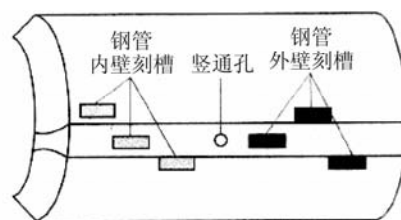


图5 ERW 焊缝超声波检测对比试块

试块具有竖通孔及内外刻槽, 位于焊缝中心的竖通孔和刻槽用于灵敏度调节, 位于热影响区的内外刻槽可用于确定超声波的有效扫查范围, 以保证声束覆盖整个焊缝及热影响区, 并且可以确定热影响区部位的检测灵敏度, 在检测灵敏度要求较高时, 也可选用 $\phi 1.6$ mm 竖通孔和 N5 刻槽进行标定。

4 结语

(1) 在 ERW 焊管的超声波检测中, 为了保证在焊管中激发出纯横波, 并且扫查到焊管内壁, 焊管中横波折射角范围的下限是 33.2° , 其上限随焊管的内外径比 r/R 的变化而变化, r/R 数值越大, 其范围也就越大。

(2) 焊管内的声束折射角为 45° 时, 对于焊缝及热影响区表面开口缺陷具有较高的检测灵敏度。但是为了兼顾焊缝内部的径向面积型缺陷的检测, 还应采用大折射角的横波声束进行扫查。

第四届无损检测高等教育发展论坛暨电磁超声无损检测技术交流会 征 文 通 知

为进一步促进我国无损检测高等教育和无损检测技术的发展,加快无损检测领域先进的新理论、新方法和新技术的应用与推广,推进相应行业产、学、研的合作与交流,由中国机械工程学会无损检测分会主办,海军航空工程学院青岛分院承办的第四届无损检测高等教育发展论坛暨电磁、超声无损检测技术交流会定于2011年7月30—8月1日在山东青岛举行,并出版《无损检测》杂志专刊和会议论文集,欢迎广大无损检测界同仁积极投稿并参加论坛,现将有关征文事项通知如下:

1 征文范围

- 无损检测高等教育发展与改革
- 电磁(涡流、漏磁、磁记忆、低频电磁场、微波)理论研究与与应用
- 超声(声脉冲、声阻抗、声振等)理论研究与与应用
- 无损检测新技术、新设备理论研究和实践应用
- 无损检测集成新技术
- 无损检测发展动态

2 论文要求

- 内容新颖、主题明确、能够反映作者近期的

研究进展或成果,文献综述类论文必须有作者的独立见解

- 未在公开出版物或全国性学术会议上发表
- 论文不得涉及秘密或科研机密,作者文责自负
- 论文格式按《无损检测》杂志投稿要求
- 大会所收录的论文在大会论文集发表,优秀论文在《无损检测》杂志专刊上发表

3 论文递交时间

- 论文摘要递交截止时间:2011年4月30日
- 论文递交截止时间:2011年6月10日。

4 论文投送地址

通讯地址:(266041)山东省青岛市四流中路2号无损检测中心

联系人:袁英民,电话(传真):0532-51833196

投稿邮箱:9902109@sina.com

5 其它事项

本次论坛将评选优秀论文。有关论坛消息请随时关注《无损检测》杂志及学会信息网(<http://www.chsndt.com>)

(中国机械工程学会无损检测分会)

(3) 要根据横波折射角和钢管直径综合考虑入射声束宽度,既要保证声束上边缘不在焊管中激发出表面波,又要避免焊管中折射纵波的出现。

参考文献:

- [1] 孙永喜. ERW 钢管在长输管道建设中的应用[J]. 油气储运, 2001, 20(1): 47.
- [2] 熊建新. 石化产业使用焊管替代无缝钢管的前景分析[J]. 焊管, 2002, 25(4): 7.
- [3] 张喜庆, 王善政, 曹建卫. 高压厚壁 ERW 直缝油井焊管应用前景分析[J]. 石油矿场机械, 2001, 30(1): 26.
- [4] 孙永喜. 城市燃气管网应用 ERW 钢管及其防腐问题[J]. 化工设备与管道, 2003(1): 40.

- [5] 刘法涛, 张始伟. 由新日铁 ERW 套管看我国高钢级 ERW 套管的发展[J]. 焊管, 2006, 29(2): 5.
- [6] 李记科, 李云龙, 黄开文, 等. 我国 ERW 焊管生产中的问题及改进措施[J]. 焊管, 2003, 26(4): 9.
- [7] 彭在美, 窦树柏. 试论我国高品质 ERW 焊管发展的技术路线[J]. 钢管, 2008, 37(3): 9.
- [8] 介升旗, 刘永平. 国内 ERW 焊管发展现状及其质量控制[J]. 焊管, 2006, 29(6): 74.
- [9] 张志刚, 刘乐. 钢板中夹杂物对高频电阻焊管质量影响浅析[J]. 无损检测, 2006, 28(6): 330.
- [10] 黄磊, 左晨. ERW 钢管焊缝轮式探头自动超声波检测[J]. 焊管, 2005, 28(5): 30.
- [11] 张鸿博. 电阻焊钢管焊缝手动超声波检测工艺及方法[J]. 石油机械, 2007, 35(17): 44.