

# 无缝钢管自动超声波检测方法研究

黄磊<sup>1,2</sup>, 张鸿博<sup>1,2</sup>, 张宝利<sup>3</sup>, 曹孟瑜<sup>4</sup>

(1. 中国石油集团石油管工程技术研究院, 陕西 西安 710077; 2. 北京隆盛泰科石油管科技有限公司, 北京 100101; 3. 巨龙钢管有限公司, 河北 青县 062658; 4. 西安阳普机电设备一体化有限公司, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 分析无缝钢管的主要缺陷形式, 应用超声波检测方法对无缝钢管进行自动检测, 主要研究检测方法、探头排列、检测闸门设置、对比样管设计和检测结果显示等方面。分析结果表明, 应用自动超声波检测方法可保证无缝钢管中各个方向的缺陷(纵向、横向和分层)100%检测, 实时显示钢管缺陷在每个检测通道中的缺陷位置和分布情况; 检测结果可永久性记录, 实现了自动超声波检测结果长久保存和可追溯要求。

**关键词:** 无缝钢管; 自动超声波检测; 探头排列; 检测闸门; 对比样管

中图分类号: TG335.71 文献标志码: B 文章编号: 1001-2311(2019)04-0068-05

## Study on Automated Ultrasonic Testing Method for Seamless Steel Tube

HUANG Lei<sup>1,2</sup>, ZHANG Hongbo<sup>1,2</sup>, ZHANG Baoli<sup>3</sup>, CAO Mengyu<sup>4</sup>

(1. CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China; 2. Beijing Longshine Oil Tubular Technology Co., Ltd., Beijing 100101, China; 3. Julong Steel Pipe Co., Ltd., Qingxian 062658, China; 4. Xi'an Yangpu Mechanical and Electrical Equipment Integration Co., Ltd., Xi'an 710061, China)

**Abstract:** The major types of defects of seamless steel tubes are analyzed. The automated ultrasonic testing (AUT) method is adopted to detect defects on seamless steel tubes. The detecting method, the probe arrangement, the detecting gate settings, the design of reference blocks and the display of testing results are studied. The analysis shows that the AUT method can guarantee a 100% detecting coverage of the longitudinal, transversal and layered defects on all directions of a seamless steel tube and display in real time the positions and distributions of the defects in each detecting channel. The testing results can be permanently recorded so as to realize the permanent storing and retrieving of the AUT detecting results.

**Key words:** seamless steel tube; automated ultrasonic testing(AUT); probe arrangement; detecting gate; reference block

无缝钢管的制造工艺有热轧、冷轧、冷拔和锻造等。对于使用条件苛刻的环境, 一般要求无缝钢管以热轧工艺制造, 与焊接钢管相比, 无缝钢管因管体组织与性能分布连续性好、使用可靠性高、产品钢种及壁厚适应范围大, 故安全级别要求较高, 在使用条件相对特殊或产品径壁比数值偏低等情形下优势明显。通常, 无缝钢管应用于油气集输管

线、海底管线以及城市油气管网。因此, 对于无缝钢管质量控制是不容忽视的。

无缝钢管是通过穿孔法和高速挤压法得到。穿孔法是用穿孔机穿孔, 同时用轧辊滚轧, 最后用芯棒轧管机定径压延平整成型; 高速挤压法是在挤压机中直接挤压成型, 这种方法加工的无缝钢管尺寸精度高。无缝钢管主要缺陷有裂纹、折叠、分层和夹杂等。对于厚壁大直径无缝钢管也可由钢锭经锻造、轧制等工艺加工而成, 锻轧管常见缺陷与锻件类似, 一般为裂纹、白点、重皮等<sup>[1]</sup>。

从超声波检测角度, 一般将无缝钢管厚径比 $\leq$

黄磊(1968-), 男, 高级工程师, 特种设备和无损检测学会无损检测高级资质, 主要从事油气输送管重大工程项目技术服务与咨询、无损检测和科研工作。

0.2 的金属管材称作薄壁管, >0.2 的金属管材称作厚壁管。薄壁管和厚壁管以纯折射横波是否可以到达管材内壁区分<sup>[1]</sup>。无缝钢管超声波检测目的是发现制造过程中产生的各种缺陷, 避免将带有危险缺陷无缝钢管投入使用。无缝钢管中缺陷大多与管体轴线平行; 因此, 无缝钢管检测以沿管体外周作周向扫查的横波检测为主。在无缝钢管中也可能存在与管体轴线垂直的缺陷, 因此必要时还应沿轴线方向进行斜入射检测。对于某些无缝钢管, 可能还需要进行纵波垂直入射声束检测。本文主要从检测方法、探头排列、检测闸门设置、对比样管设计和检测结果显示等方面进行研究, 对于无缝钢管全覆盖检测, 减少油气集输管线、海底管线以及城市油气管网中出现的各种失效事故至关重要<sup>[2-9]</sup>。

## 1 检测方法

无缝钢管主要缺陷为平行于管轴径向缺陷(称纵向缺陷), 有时也有垂直于管轴径向缺陷(称横向缺陷)。对于大直径薄壁无缝钢管, 可能还需要进行纵波垂直入射检测与管轴平行的周向缺陷(称分层缺陷)。现主要研究接触法检测。如果无缝钢管直径较小, 应选取晶片直径较小的探头, 不论从耦合效果还是可靠性方面均较好。因此, 从纵向、横向和分层缺陷(或厚度检测)检测进行研究。

### 1.1 纵向缺陷检测

对于薄壁无缝钢管(厚径比 $\leq 0.2$ ), 用斜探头沿外周作周向扫查横波检测是无缝钢管检测主要方式, 目的是检测内、外壁以及管壁中纵向缺陷。在实际检测时, 通常希望无缝钢管中存在单一波形, 以便于正确判断缺陷信号。因此, 检测中斜探头入射角选择在第一临界角和第二临界角之间, 使无缝钢管中只存在纯横波。纵向缺陷的横波周向检测法如图 1 所示<sup>[10]</sup>。要实现这种检测, 必须满足:

$$\beta_s \leq \arcsin(r/R) \quad (1)$$

式中  $\beta_s$  —— 斜探头横波折射角, ( $^\circ$ );

$R$  —— 钢管外半径, mm;

$r$  —— 钢管内半径, mm。

对于厚壁无缝钢管(厚径比 $> 0.2$ ), 常规斜探头横波声束无法到达无缝钢管内壁, 因此用横波实现整个管壁横截面检测是很困难的, 可用变形横波斜射法进行补充检测。纵向缺陷的变形横波斜射法如图 2 所示<sup>[10]</sup>, 选择第一临界角以下小角度入射, 进入管壁超声波型既有纵波也有横波, 但横波强度

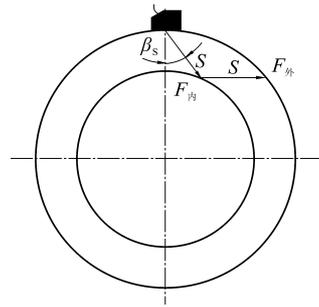


图 1 纵向缺陷的横波周向检测法示意

很弱, 检测主要以纵波为主。纵波斜射法缺点是检测时显示除折射纵波外, 还存在折射横波在内壁上产生多次反射回波, 波形比较复杂, 因此不能用于自动化检测(对于厚径比 $> 0.2$ 的无缝钢管, 应采用变形横波法检测)。

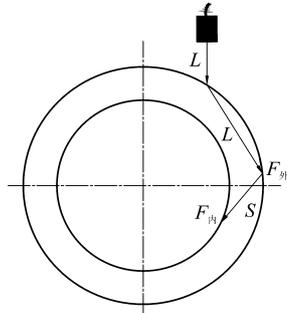


图 2 纵向缺陷的变形横波斜射法示意

### 1.2 横向缺陷检测

用斜探头(一般为  $45^\circ$ )横波对横向缺陷进行轴向检测, 具体如图 3 所示<sup>[10]</sup>。这时声束在内壁反射波进一步发散, 声能损失大, 因此外壁缺陷灵敏度较低, 检测时要注意这一点。

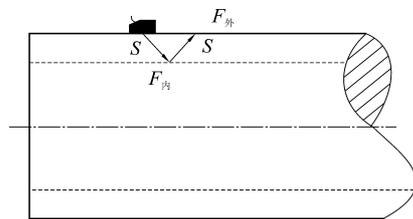


图 3 横向缺陷的横波轴向检测法示意

### 1.3 分层缺陷检测(或厚度检测)

由于分层缺陷在管壁中沿周向分布且平行于钢管表面, 一般采用纵波双晶直探头(或单晶直探头)检测, 分层缺陷(或厚度检测)纵波垂直检测法如图 4 所示。当缺陷较小时, 缺陷波与底波同时出现,

这时可根据缺陷波高度来评价缺陷大小。当缺陷较大时,底波将会消失,这时可用半波高度法来确定缺陷面积大小。

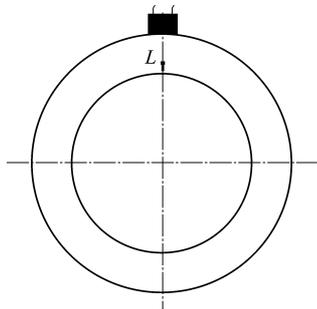


图4 分层缺陷(或厚度检测)纵波垂直检测法示意

## 2 探头排列

由于无缝钢管可能存在纵向、横向和分层3种类型缺陷形式<sup>[11-14]</sup>,因此探头排列应按照能检测出这3种类型缺陷进行考虑。目前,对于无缝钢管自动化检测大约有3种模式:一、探头旋转,钢管直线前行;二、探头固定,钢管螺旋前行;三、探头直线运动,钢管原地旋转。本研究的探头排列以模式三为例,探头直线运动速度与管体均匀旋转速度相匹配,必须满足全管体被探头100%扫查。为了防止检测速度太大而造成漏检,一般采取阵列式组合探头。

### 2.1 纵向缺陷探头排列

检测无缝钢管纵向缺陷,用斜探头产生横波进行周向检测。另外,为了检测不同取向缺陷,应从正反两个方向进行检测。检测纵向缺陷阵列式组合探头采用2组6个晶片组成(如 $L_{11}-L_{21}-L_{31}-L_{41}-L_{51}-L_{61}$ 和 $L_{12}-L_{22}-L_{32}-L_{42}-L_{52}-L_{62}$ ),纵向缺陷探头排列如图5所示。

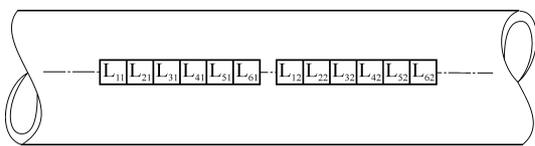


图5 纵向缺陷探头排列示意

### 2.2 横向缺陷探头排列

为了检测无缝钢管横向缺陷,用斜探头(一般为 $45^\circ$ )横波进行轴向检测。另外,为了检测不同取向的缺陷,应从正反两个方向进行检测。检测横向缺陷的阵列式组合探头采用2组6个晶片组成

(如 $T_{11}-T_{21}-T_{31}-T_{41}-T_{51}-T_{61}$ 和 $T_{12}-T_{22}-T_{32}-T_{42}-T_{52}-T_{62}$ ),横向缺陷探头排列如图6所示。

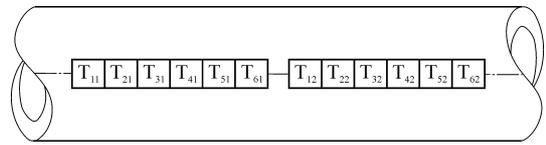


图6 横向缺陷探头排列示意

### 2.3 分层缺陷(或厚度检测)探头排列

为了检测无缝钢管的分层缺陷(或厚度检测),一般采用纵波双晶直探头(或单晶直探头)。检测分层缺陷(或厚度检测)的阵列式组合探头采用1组6个晶片组成(如 $WT_1-WT_2-WT_3-WT_4-WT_5-WT_6$ ),分层缺陷(或厚度检测)探头排列如图7所示。

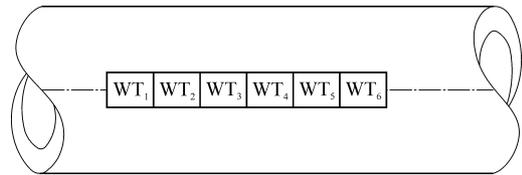


图7 分层缺陷(或厚度检测)探头排列示意

## 3 检测闸门设置

主要研究检测探头在壁厚范围全覆盖,即研究检测闸门设置问题。检测闸门设置从纵向、横向和分层缺陷(或厚度检测)3个方面进行研究。

### 3.1 纵向缺陷检测闸门设置

纵向缺陷检测时,需要监测一次波和二次波的缺陷情况,因此设置双闸门检测。纵向缺陷检测闸门设置如图8所示。 $T$ 为始脉冲波, $F_{内}$ 为内表面纵向刻槽反射波, $F_{外}$ 为外表面纵向刻槽反射波。探头 $L_{11}$ 一次波检测闸门起点在图8所示始波后端至少1~2 mm处,闸门终点设置在内表面刻槽反射波前端至少1~2 mm处;探头 $L_{11}$ 二次波检测闸门起点在图8所示内表面刻槽反射波后端至少1~2 mm处,闸门终点设置在外表面刻槽反射波前端至少1~2 mm处。其余纵向缺陷检测闸门设置与探头 $L_{11}$ 检测闸门设置相似。

### 3.2 横向缺陷检测闸门设置

横向缺陷检测时,也要监测一次波和二次波缺陷情况,因此设置双闸门检测。横向缺陷检测闸门设置如图9所示,探头 $T_{11}$ 一次波检测闸门起点在图9所示始波后端至少1~2 mm处,闸门终点设置

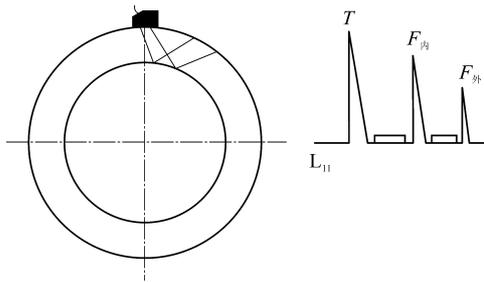


图8 纵向缺陷检测闸门设置示意

在内表面刻槽反射波前端至少 1~2 mm 处；探头  $T_{11}$  二次波检测闸门起点在图 9 所示内表面刻槽反射波后端至少 1~2 mm 处，闸门终点设置在外表面刻槽反射波前端至少 1~2 mm 处。其余横向缺陷检测闸门设置与探头  $T_{11}$  检测闸门设置相似。

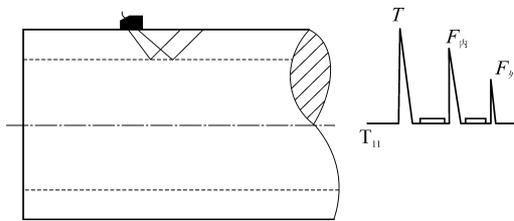


图9 横向缺陷检测闸门设置示意

### 3.3 分层缺陷(或厚度检测)检测闸门设置

分层缺陷检测(或厚度检测)时,采用双晶探头(或单晶探头)进行检测,主要监测一次波缺陷情况。分层缺陷(或厚度检测)检测闸门设置如图 10 所示,  $S$  为双晶探头界面波,  $B$  为底面反射波。探头  $WT_1$  检测闸门起点在图 10 所示界面波后端至少 1~2 mm 处,闸门终点设置在底面反射波前端至少 1~2 mm 处。其余分层缺陷(或厚度检测)检测闸门设置与探头  $WT_1$  检测闸门设置相似。

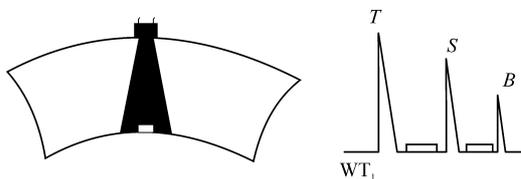


图10 分层缺陷(或厚度检测)检测闸门设置示意

## 4 对比样管设计

对比样管中包含一系列不同类型的人工缺陷,不同类型人工缺陷可以模拟不同部位和种类无缝钢管缺陷,可以客观评价无缝钢管质量水平。一个设

计不合格对比样管或样管上人工缺陷加工精度不高都会导致缺陷的漏检或误判。对比样管设计目的是保证被检测对象中所有缺陷能检测出来。

对于检测纵向和横向缺陷采用内外表面刻槽(如无缝钢管超声波检测的对比样管人工缺陷主要分为 3 种:纵向刻槽、横向刻槽和平底孔 L2、L2.5 或 L3)校验检测灵敏度,且内外刻槽也可用作设置闸门起点和终点。对于检测分层缺陷采用不同深度平底孔(如  $\Phi 6$  mm 平底孔)校验检测灵敏度和设置闸门起点和终点。所有人工缺陷必须保持一定间距,不同人工缺陷不会受相邻人工缺陷超声波干扰。设计的无缝钢管对比样管人工缺陷分布如图 11 所示<sup>[15]</sup>。其中,①②⑥⑦为内外表面纵向刻槽,③④⑧⑨为内外表面横向刻槽,尺寸均为 50.0 mm  $\times$  1.0 mm  $\times$   $nt$  mm(长度 $\times$ 宽度 $\times$ 深度),与内外表面垂直,深度为  $nt$ (最小为 0.5 mm),长度 50.0 mm(一般探头宽度 1.5 倍), $n$  一般取 5%、8%或 10%, $t$  为钢管壁厚;⑤为  $\Phi 1.6$  mm 竖通孔;⑩⑪⑫为内侧平底孔,孔径为 6.0 mm,埋深分别为壁厚的 25%、50%和 75%<sup>[12-14]</sup>。

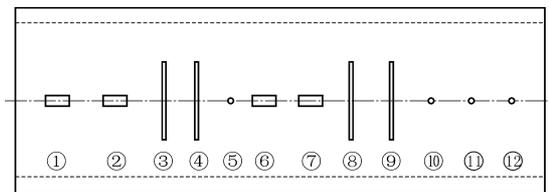


图11 设计的对比样管人工缺陷分布示意

对比样管及其使用要求:①对比样管应与被检测无缝钢管具有相同的公称尺寸,相同或相近的表面状态和声学特性;②加工对比样管之前需要对制作样管的管材进行无损检测,保证其内部没有超过  $\Phi 2.0$  mm 平底孔的缺陷;③对比样管中的人工缺陷必须由计量部门校准,合格后方可使用。

## 5 检测结果显示

由于无缝钢管自动超声波检测的速度快、自动化程度高,要求每一根无缝钢管在进行自动检测后,应能同步显示检测波形和检测数据,这样才能保证检测结果永久保存和质量追溯性。因此,要求检测结果应自动显示每个通道缺陷位置、缺陷分布等信息。

试验用无缝钢管规格为  $\Phi 73$  mm  $\times$  9.19 mm,检测纵向缺陷采用 2 组 6 个晶片组成的阵列式组合探

头(如  $L_{11}$ - $L_{21}$ - $L_{31}$ - $L_{41}$ - $L_{51}$ - $L_{61}$  和  $L_{12}$ - $L_{22}$ - $L_{32}$ - $L_{42}$ - $L_{52}$ - $L_{62}$ ), 检测横向缺陷采用 2 组 6 个晶片组成的阵列式组合探头(如  $T_{11}$ - $T_{21}$ - $T_{31}$ - $T_{41}$ - $T_{51}$ - $T_{61}$  和  $T_{12}$ - $T_{22}$ - $T_{32}$ - $T_{42}$ - $T_{52}$ - $T_{62}$ ), 检测分层缺陷(或厚度检测)采用 1 组 6 个晶片组成的阵列式组合探头(如  $WT_1$ - $WT_2$ - $WT_3$ - $WT_4$ - $WT_5$ - $WT_6$ ), 试验检测结果自动显示。

可以看出: 无缝钢管检测显示图显示出了每个通道人工缺陷位置与分布。设计的对比样管中纵向、横向和分层缺陷在扫描图中均显示出来, 这就证明了对无缝钢管自动超声波检测方法研究结果是正确的、可靠的。

## 6 结 语

无缝钢管超声波检测技术是一种常规无损检测技术, 但无损钢管自动超声波检测技术和常规无缝钢管超声波检测技术还是有很大的区别, 必须从检测方法、探头排列、检测闸门设置、对比样管设计和检测结果显示等方面研究, 才能有效地检测无缝钢管的各种缺陷。通过对无缝钢管自动超声波检测方法进行研究, 得出以下结论:

- (1) 保证了无缝钢管中各个方向的缺陷(纵向、横向和分层)100%检测;
- (2) 实时显示了钢管中缺陷在每个检测通道中位置和分布情况;
- (3) 检测结果永久性记录形式, 实现了自动超声波检测结果长久保存和可追溯要求。

## 7 参考文献

[1] 郑晖, 林树青. 超声检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008.

- [2] 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.
- [3] 赵仁顺. ISO 和 ASTM 标准中无缝钢管探伤方法对比分析[J]. 钢管, 2014, 43(5): 75-82.
- [4] 李跟社, 袁兴龙, 张银亮. 厚壁无缝钢管纵向内壁缺陷超声波探伤方法的研究[J]. 钢管, 2018, 47(5): 55-58.
- [5] 季连春, 祝春清, 李传永.  $\Phi 140$  mm 机组热轧无缝钢管的探伤设备[J]. 钢管, 1999, 28(2): 42-44.
- [6] 胡才望. 斜探头的磨损对管材超声波探伤结果的影响[J]. 钢管, 2006, 35(2): 43-45.
- [7] 况雪军. 国内无缝钢管涡流及超声波自动探伤的现状及发展[J]. 钢管, 2007, 36(5): 54-56.
- [8] 刘军华. URP 系列自动超声波探伤机在无缝钢管生产中的应用[J]. 钢管, 2010, 39(3): 60-64.
- [9] 常少文. 油井管超声波自动探伤系统的研制与应用[J]. 钢管, 2011, 40(2): 57-61.
- [10] 日本非破坏检查协会. 超声探伤B[M]. 马羽宽, 姜志明, 李世荣, 译. 长春: 吉林科学技术出版社, 1985.
- [11] GB/T 19830—2017 石油天然气工业 油气井套管或油管用钢管[S]. 2017.
- [12] ISO 11960:2014 Petroleum and natural gas industries-steel pipes for use as casing or tubing for wells[S]. 2014.
- [13] API Spec 5CT—2018 套管和油管规范[S]. 10 版. 2018.
- [14] DEP 31.40.20.37-Gen—2010 Line pipe for critical service (Amendments/supplements to ISO 3183 :2007) [S]. 2010.
- [15] Q/SY-TGRC106—2016 油气输送管线用无缝钢管电磁超声自动检测方法[S]. 2016.

(收稿日期: 2019-01-13)

## ● 简 讯

《石油天然气工业用内覆或衬里耐腐蚀合金复合钢管》国家标准获批准发布 [发布日期: 2019-06-12] 由全国石油天然气标准化技术委员会石油专用管材分技术委员会组织起草的《石油天然气工业用内覆或衬里耐腐蚀合金复合钢管》国家标准已正式获国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会批准和发布, 标准编号为 GB/T 37701—2019。该标准的批准发布日期为 2019 年 6 月 4 日, 实施日期为 2020 年 1 月 1 日。该项国家标准由中国石油集团石油管工程技术研究院负责, 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司、浙江天管久立特材有限公司、中国石油工程建设有限公司西南分公司、中国石油阿姆河天然气勘探开发(北京)有限公司等部分油田用户、设计单位、工程建设单位及复合管制造企业参与制定完成。该标准是在相关国内外标准结合国内外多家制造企业的制造工艺和产品检验结果、油田应用以及前期科研成果的基础上整合提炼自主制定的。

(摘自: 中国石油集团石油管工程技术研究院网站)