

# 钢管焊缝超声波自动检测系统的能力鉴定

甘正红<sup>1</sup>, 方晓东<sup>2</sup>, 余 洋<sup>1</sup>, 苏继权<sup>1</sup>

(1. 上海中油天宝巴圣钢管有限公司, 上海 201114; 2. 江苏通宇钢管集团有限公司, 扬州 225008)

**摘 要:**结合 API 5L/ISO3183 标准对钢管焊缝超声波自动检测的要求, 探讨了多通道钢管焊缝超声自动检测系统能力鉴定的方法及性能指标并通过了实际应用, 表明该能力鉴定的可行性。

**关键词:**钢管焊缝; 超声自动检测系统; 能力鉴定

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: B

文章编号: 1000-6656(2013)10-0028-05

## Identification of the Capability of Steel Pipe Weld Automatic Ultrasonic Testing System

GAN Zheng-Hong<sup>1</sup>, FANG Xiao-Dong<sup>2</sup>, YU-Yang<sup>1</sup>, SU Ji-Quan<sup>1</sup>

(1. Shanghai Zhongyou TIPO Brastubo Steel Pipe Co Ltd, Shanghai 201114, China;

2. Jiangsu Tongyu Steel Pipe Group Co Ltd, Yangzhou 225008, Yangzhou, China)

**Abstract:** The identification method and performance indications of the multi channel steel pipe weld automatic ultrasonic testing system were discussed combined with requirement of API 5L/ISO3183 standard, and the feasibility of identification was proven through the actual application.

**Keywords:** Steel pipe weld; Automatic ultrasonic testing system; Capability identification

在按照 API 5L/ISO3183《管线钢管规范》标准<sup>[1]</sup>生产钢管的过程中, 焊缝超声波自动检测成为控制钢管质量的必备检测手段。在欧、美等发达国家, 超声波已经取代射线成为钢管焊缝检测的第一手段。API 5L/ISO3183 附录 E 规定, 焊缝检测中超声波检测是必须进行的检测手段, 是否对全部焊缝进行射线检测, 由钢管用户和制造厂家协商决定。标准要求将超声波检测作为特殊过程加以控制, 要求进行设备校准, 对其有效性进行周期性确认, 保存验证系统检验能力的记录。鉴于目前国内外对多通道钢管焊缝超声波自动检测系统的仪器和系统的性能测试还没有相应的标准或规范, 笔者针对钢管旋转时探头直线前进或钢管固定时探头直线前进等方式多通道超声波自动检测系统进行周期性鉴定的方法进行探讨, 以确保钢管产品质量的控制, 满足标准的要求, 同时也为超声波自动检测系统设备的供需

双方验收提供一定的依据。

### 1 鉴定系统检验能力的主要内容

API 5L/ISO3183 附录 E 规定, 用参考反射体确定设备检验灵敏度时, 制造商要保存验证系统检验能力的无损检验(NDE)系统记录。这些验证记录至少包括: 覆盖面的计算(即扫描方案)、对预定壁厚的检测能力、重复性、检测制管工艺产生的典型缺陷的探头布置方法(见 API 5L/ISO3183 标准附录 E 表 E. 7, 注 j)、采用 API 5L/ISO3183 附录 E. 5 适用无损检测(NDE)方法, 检测出制管工艺的典型缺陷的证明资料、门限设定参数。

笔者认为, 对于验证系统检验能力记录的保存, 一部分可以通过工艺文件(在文件中以文字或辅以图示)来保存, 一部分还需通过仪器检测系统的电脑实时自动保存记录(通过打印或自动回放提取)。

### 2 鉴定检测系统能力的条件

API 5L/ISO3183 标准规定每个对比标样的外径和壁厚应在被检产品的规定直径和壁厚的公差范

收稿日期: 2012-12-25

**作者简介:**甘正红(1973—), 男, 高级工程师, 无损检测高级人员, 全国无损检测标准化技术委员会委员, 主要从事无损检测和钢管质量、技术管理工作。

围内。因此应针对自动检测系统对不同产品进行正常检测时的检测条件,确定鉴定时的检测条件范围。当不同产品的检测条件范围相差较大时,可针对不同产品分别确定鉴定时的检测条件范围,测试时应按最不利于检测结果的条件进行测试。如在设备验收鉴定时可以选取设备适用的钢管管径和壁厚上下限来确定。

### 3 检测系统的校准

#### 3.1 对比标样的制备

钢管焊缝对比标样是在焊管内外壁分别刻制纵向或横向的矩形或“U”形槽,或径向钻孔。API 5L/ISO3183 标准及部分钢管补充规范对标样的制作要求一般如图 1 所示(不同焊管的人工缺陷可以根据标准要求取舍)。

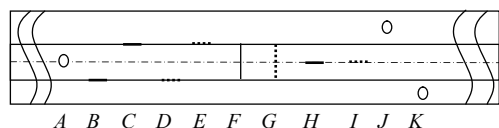


图 1 钢管焊缝超声自动检测对比样管及人工缺陷(参考指示器)

图 1 中 A 为焊缝中心  $\phi 1.6(3.2)$  mm 竖通孔; B/C 为焊缝边缘外表面 N5(N10)纵向刻槽; D/E 为焊缝边缘内表面 N5(N10)纵向刻槽; F/G 为焊缝中横向的 N5(N10)内、外刻槽; H/I 为焊缝上纵向的 N5(N10)内、外表面刻槽; J/K 为离焊缝边缘 3~5 mm 的  $\phi 3.2$  mm 竖通孔。其中 N5(N10)分别代表壁厚的 5%和 10%。

对比标样长度可由生产商确定任一适合长度;对比标样的刻槽或钻孔应分开足够的距离,以便检测系统有足够的分辨力来分别显示每一个人工缺陷。对比刻槽或钻孔的尺寸和类型应按照国家标准程序进行校验,一般对比标样的人工缺陷几何尺寸应由专门计量机构测量检定。

#### 3.2 设备校准

钢管焊缝一般采用横波检测法进行检测,探头耦合方式有水膜法、水柱法等。校准时,制造商应采用标准工艺程序建立超声波检验的拒收界限。采用对比刻槽或钻孔检验对比标样时,设备应调整到产生良好的信号。API 5L/ISO3183 标准附录 E 中表 E.7 给出的对比刻槽或钻孔应在正常操作条件下被检出,此能力应进行动态验证,制造商可选择在线或离线验证,钢管和探头的移动速度应模拟成品钢管

检验时的运动速度。设备应通过合适的对比刻槽或通孔(如图 1 所示)进行标定,每班至少两次,第二次校准应在第一次校准后的 3 到 4 小时进行,以便验证设备的有效性和检验程序的有效性。设备标定应在检验周期最后结束前得到确认。

检测灵敏度应进行同温校准,即与检测温度基本相同;同时还要分别进行静态和动态校准,这样才能保证灵敏度校准的准确性和可靠性。校准时应注意,在静态校准达到标准要求灵敏度后,可适当增益 2~3 dB 用于补偿,然后进行动态校准。

### 4 系统的主要性能指标及鉴定方法

#### 4.1 设备性能

探头对被检钢管焊缝的扫查方式可分为钢管旋转,探头直线移动;钢管固定,探头直线移动;探头固定,钢管直线移动等。因此对于超声波自动检测系统来说,钢管旋转或前进速度的控制精度及探头移动跟踪焊缝的精度是极为重要的参数。控制不好会导致探头耦合不良以及机械执行检测跟踪不良会出现漏检和误报。因此要对机械系统的控制精度提出严格要求。

自动超声波检测系统应配有喷标、声、光自动报警系统及缺陷自动记录系统。

#### 4.2 仪器性能

##### 4.2.1 垂直线性和水平线性测试

仪器垂直线性的好坏直接影响到对缺陷的定量精度。水平线性指仪器荧光屏上时间基线的水平刻度值与实际声程成正比的程度,水平线性的好坏会影响缺陷定位。对仪器垂直线性和水平线性的测量可以按照标准 JB/T 9214 和 JB/T 10061 进行。一般要求仪器的垂直线性误差不大于 5%、水平线性误差小于等于 1%。

##### 4.2.2 动态范围测试

将标准回波探头依次与仪器的检测通道相接,将仪器的抑制设为零。调整增益,使其中某次回波刚好满屏但不饱和,记录此时仪器的增益值。然后将该回波衰减到刚能识别时的最小值,则仪器的动态范围值就等于所衰减的 dB 数。一般要求仪器的动态范围不小于 26 dB。

#### 4.3 综合性能测试

进行下列性能测试时,应先用对比样管调整好仪器的检测灵敏度,使各人工缺陷的反射波幅达到满屏的 80%。

#### 4.3.1 信噪比(SNR)测试

信噪比是一个与超声自动检测系统质量好坏有关的重要参数。如果杂波信号幅度与缺陷信号幅度相等,则缺陷检测能力会受到严重削弱。若信噪比小于 6dB,则缺陷检测能力就值得怀疑了。测试时用对比样管重复通过检测系统,调节各通道对  $\phi 1.6$  mm 竖通孔的灵敏度,将波高设置为 80% 满屏高度,记下各通道的 dB 值;然后分别提高各通道的灵敏度,记下各通道中噪声信号刚刚达到 80% 满屏高度的 dB 值,两者 dB 之差即为该通道的信噪比。每个通道重复检测 3 次,3 次结果不同时取最差值,此值一般应不小于 14 dB。

#### 4.3.2 检测稳定性测试

检测系统连续工作 4 小时后,重新使用对比标样对系统标定一次,要求各通道检测灵敏度的波动不得超过 2 dB。

#### 4.3.3 漏、误报率测试

在对比标样上将所有人工缺陷的波幅调达到报警的基础上,可适当提高 2 dB 的增益,使探头和钢管表面之间的移动速度与成品钢管检验时所采用的速度一致。连续测试 10 次对比样管,分别记下样管上人工缺陷的漏、误报次数。每漏报 1 个人工缺陷记漏报 1 次,任一通道在无人工缺陷处报警记误报 1 次。漏、误报率可分别按下式计算:

$$\begin{aligned} \text{漏报率} &= \frac{\text{漏报人工缺陷个数}}{\text{对比试样人工缺陷个数} \times \text{测试次数}} \times 100\% \\ \text{误报率} &= \frac{\text{误报次数}}{\text{测试次数}} \times 100\% \end{aligned}$$

一般要求系统各通道对所有人工缺陷均应报警;误报率小于等于 3%。

#### 4.3.4 管端不可探测区(管端盲区)测试

根据探头架系统的实际情况和检测速度确定标样管端检测盲区的长度。测试时在距样管的两端适当长度的焊缝上各加工一个  $\phi 1.6$  mm 竖通孔,在设备上重复测 3 次样管,要求各通道均能检测出这个竖通孔,以证明系统对管端的检测盲区长度小于该长度。管端不可探测区(管端盲区)一般要求小于 100 mm,且手工超声波复探时要求检测长度大于管端不可探测区(管端盲区)长度。

### 4.4 覆盖面计算(如扫描方案)

#### 4.4.1 扫描方案考虑探头的布置和跨距的选择

由于钢管焊缝在生产过程中产生缺陷的特殊性,焊缝超声波自动检测系统的基本工作原理是使

用横波探头,探头的布置和跨距的选择原则是必须能检测整个焊缝厚度和检测所有取向的缺陷。埋弧焊钢管焊缝中的缺陷主要为纵向和横向分布两类,电阻焊钢管焊缝中的缺陷主要为纵向缺陷分布。对于纵向缺陷一般采用将探头置于焊缝两侧,探头垂直入射焊缝;对于横向缺陷,采用水柱耦合法时一般采用斜探头(由于水柱耦合法实现将探头置于两侧检测横向缺陷很困难);采用水膜耦合法时一般是将一对探头置于焊缝两侧一发一收,以减少超声波漫反射。

为了保证超声波声束覆盖整个壁厚和焊缝宽度,又根据纵向缺陷检测要求大约是一组探头对覆盖 7~10 mm 的钢管壁厚,所以对于  $T=6\sim 12$  mm 的钢管,一般采用 3 对(共 6 个)探头,即 4 个探头(图 2 探头对  $L_1/L_3$ )检测纵向缺陷,2 个探头“K”型配置一发一收(图 2 探头对  $T_1$ )采用水膜法检测横向缺陷;对于  $12\text{ mm} < T \leq 26$  mm 的钢管宜采用 5 对探头(共 10 个探头),即 6 个探头(图 2 探头对  $L_1/L_2/L_3$ )检测纵向缺陷,4 个探头“K”型配置一发一收(图 2 探头对  $T_1/T_2$ )采用水膜法检测横向缺陷,使声束能覆盖全部焊缝截面。对于水柱耦合法检测横向缺陷,采用 2 个探头在焊缝上入射,一个探头扫描下表面,一个探头扫描上表面,声束在焊缝内成“Z”字型(图 2 的 OB 型探头)。

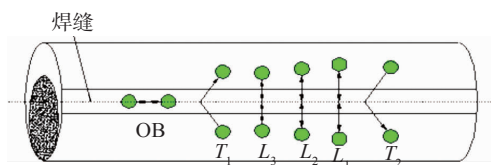


图2 探头布置

为了正确选择探头的位置与检测时的灵敏度,检测焊缝的纵向缺陷时,探头与焊缝中心线的距离  $L$  应是全声程(跨距  $P$ )的倍数,即:

$$L = K \cdot P = K \cdot 2 \tan \beta \cdot B$$

式中:  $\beta$  为超声波检测的折射角,一般  $\beta=60^\circ\sim 70^\circ$ ;  $B$  为被检测钢管的壁厚,mm;  $K$  为系数,可以是 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25 等,系数  $K$  值影响覆盖焊缝声束的声强度与声强度在此范围内的均匀性。对于不同厚度的钢管,  $K$  值的选择应该是有差别的。

检测焊缝的横向缺陷时,探头的工作状态如果采用图 2 中“K”型配置的一发一收( $T_1/T_2$ ),探头离焊缝中心线距离的选择原则与检测纵向缺陷时是相同的,只是它的距离  $H$  还与声束与中心线的交角  $\delta$

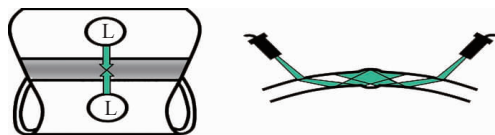


有关:

$$H = \sin\delta \cdot K \cdot 2\tan\beta \cdot B$$

#### 4.4.2 声束对焊缝的覆盖面

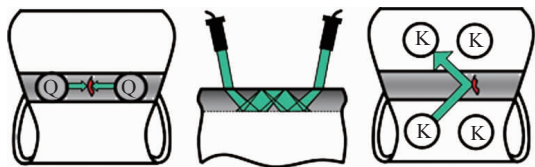
纵向布置探头的声束覆盖见图 3。



(a) 探头布置 (b) 声束覆盖

图 3 纵向缺陷的探头布置声束覆盖

对用于检测横向缺陷的探头,探头布置为“OB”型(即探头放置在焊缝上),声束覆盖见图 4(a)和(b)，“K”型布置的探头声束覆盖见图 4(c)。



(a) OB 型探头布置 (b) 声束覆盖 (c) K 型探头布置

图 4 横向缺陷的探头布置与声束覆盖

#### 4.5 对预定壁厚的检测能力

##### 4.5.1 斜探头折射角的选择

焊缝中的危险性缺陷大多垂直或近于垂直探测面,所以一般宜选用斜探头进行检测。其折射角的选择应从以下 3 个方面考虑:

- (1) 声束能扫查到整个焊缝截面。
- (2) 声束中心线尽量与主要危险性缺陷垂直。
- (3) 保证有足够的检测灵敏度。

一般斜探头折射角可根据钢管厚度来选择。薄壁钢管采用大折射角,以避免近场区探伤,提高定位定量精度;厚壁钢管采用小折射角,以缩短声程,减少衰减,提高检测灵敏度。结合钢管壁厚生产实际,一般采用较大  $K$  值探头,这样可保证避开近场区的影响。一般检测纵向缺陷的探头选折射角为  $60^\circ \sim 70^\circ$ ;检测横向缺陷的探头折射角一般选用  $45^\circ$  即可。

##### 4.5.2 API 5L/ISO3183 标准附录 E 规定

超声波检验设备应能检验如下钢管焊缝的整个壁厚:对于 EW(电阻焊缝)和 LW(激光焊缝),焊缝熔合线和焊缝熔合线两侧各 1.6 mm 宽的母材;对于 SAW(埋弧焊缝)和 COW(组合焊缝),焊缝金属和焊缝两侧各 1.6 mm 宽的母材。因此笔者认为应设定这样的标样来检验是否真实达到覆盖的母材宽度和壁厚,一般是在离焊缝边缘 3~5 mm 的母材上

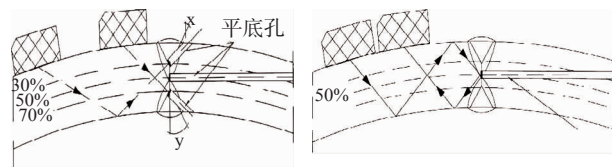
钻  $\phi 3.2$  mm 竖通孔来设置闸门的宽度,如图 1 所示的 J/K 孔。

#### 4.6 重复性测试

连续重复测试 10 次对比样管,记录每个检测通道对标样的检测幅度,并计算其标准偏差,一般要求标准偏差小于等于 1 dB。

#### 4.7 检测制管工艺产生的典型缺陷的探头布置方法

API 5L/ISO3183 标准对本条的规定是针对 SMLS(无缝)钢管,笔者认为对于钢管焊缝也可以参照执行。如 DNV-OS-F101《海底管线系统》标准<sup>[2]</sup>规定,对于厚度大于等于 19 mm 的钢管以及 SHELL 壳牌标准<sup>[3]</sup>针对不同壁厚的钢管焊缝增加一定的探头对,检测坡口边缘的未熔合以及壁厚中间位置的未焊透缺陷。如图 5 的探头布置和声束发射接收。



(a) 焊缝熔合线

(b) 焊缝未焊透

模拟缺陷平底孔

模拟缺陷平底孔

图 5 典型缺陷的探头布置和声束发射接收图

#### 4.8 采用 API 5L /ISO3183 附录 E.5 适用的无损检测(NDE)方法,检测出制管工艺的典型缺陷的证明资料

随着现代计算机水平的高速发展,超声波数字自动检测仪器的水平日新月异。要求检测系统具备准确的缺陷记忆能力,可重现性是控制检测质量的重要方面。检测仪器系统应具备良好的稳定性、足够的检测灵敏度、闸门可以任意设置等基本性能,能够显示和存储检测过程各个通道行走距离与缺陷波高的二维曲线也是钢管焊缝超声自动检测系统必备指标,即要求对检测波形进行存储和回放,这是对检测制管工艺的典型缺陷及标样校准的有效证明资料。

#### 4.9 门限设定

闸门的设置与调节主要是考虑检测区域的宽度。闸门通常由焊缝宽度和检测缺陷的需要来设置。检测缺陷区域为焊缝与热影响区及一定宽度范围的母材。自动超声波检测闸门的设置与调节主要考虑闸门的起点与终点(即闸门的长度)和闸门的高度。

检测纵向缺陷时,闸门的起点设置在距焊趾3~5 mm的竖通孔前端,以保证热影响区缺陷不致漏检。闸门的终点设置在焊缝中心竖通孔后端离焊角反射波约3 mm处,保证焊角反射波不进入闸门并保证覆盖焊缝中心线(如图6所示为纵向缺陷检测探头L<sub>1</sub>的闸门的设置与调节,其余探头的闸门设置与调节与探头L<sub>1</sub>相似)。这样2对或者3对检测纵向缺陷的4个或者6个探头就保证了检测焊缝、热影响区及一定宽度的母材(具体宽度由距焊趾竖通孔的位置决定)。闸门的高度一般设置为孔或槽标样波高为满屏高的80%,若回波幅度低于设置值时,仪器不报警,若回波幅度高于设置值时,仪器报警。

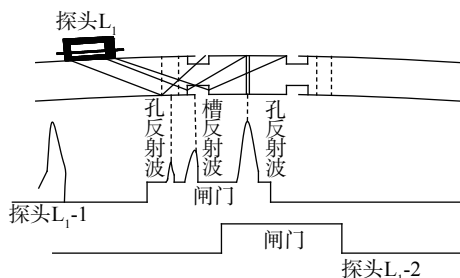


图6 纵向缺陷检测探头的闸门设定

采用水柱耦合法检测横向缺陷时,由于超声波是在焊缝内成“Z”字型反射,只要在界面波和底波之间有反射信号即为缺陷波,闸门的宽度可设置在界面波和底波之间(如图7所示)。闸门的高度一般设置为内或外横向刻槽满屏波高的80%,若回波幅度低于设置值时,仪器不报警,若回波幅度高于设置值时,仪器报警。

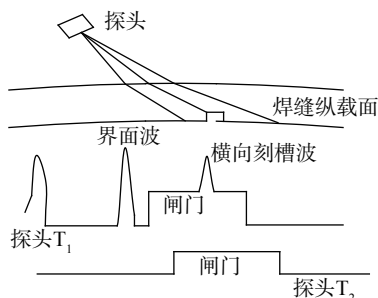


图7 横向缺陷检测探头的闸门设定

采用水膜耦合法检测横向缺陷时,闸门设置宽度一般为焊缝宽度再加两侧热影响区的宽度。

报警闸门位置的调节对钢管焊缝自动超声波检测至关重要,闸门宽度和位置的设置要保证覆盖整个检测区域,且不能使检测区域内缺陷回波因不在

报警闸门范围内而漏检,如咬边、焊趾缺陷等;也不能使焊角反射波进入闸门而变成连续误报。

#### 4.10 检测(扫描)速度的确定

为了使缺陷回波能充分地被探头接收,并在显示器上有明显的显示或在记录装置上得到明显的记录,检测(扫描)速度应适当。通常,这取决于探头的有效尺寸和仪器的重复频率。探头有效直径 $D$ 愈大,重复频率愈高,检测(扫描)速度可以相应提高。

检测(扫描)速度可按照如下公式计算:

$$V_c \leq W_c \cdot \text{PRF} / 3$$

式中: $V_c$ 为检测速度; $W_c$ 为探头在钢管长度方向上灵敏度降低6 dB的波束宽度;PRF为仪器重复频率,一般在几百至几千赫兹之间,具体数值须随焊缝厚度而定。

当检测系统对刻槽或钻孔的检出能力进行动态验证时,探头与钢管表面之间的移动速度还应与成品钢管检验时所采用的速度一致。

## 5 应用效果

笔者所在公司是国内大口径厚壁直缝埋弧焊管的专业生产厂家,采用国产设备CF-V24型超声波自动检测系统对直缝埋弧焊管进行检测。上述鉴定方法已在该设备上成功应用多年。表1为对双面埋弧焊管焊缝进行超声自动检测系统鉴定时的测试结果。可见,设备满足API 5L/ISO3183标准的检测要求。

表1 钢管焊缝超声自动检测系统鉴定结果

测试项目	测试结果
钢管规格	$\phi 508 \text{ mm} \times 7.1 \text{ mm}$ ; $\phi 1219 \text{ mm} \times 26 \text{ mm}$ ; 采用图1规定标样
鉴定参数	探头前进速度 5 m/min; 仪器重复频率 2 000 Hz
仪器性能	垂直线性 $\leq 1.5\%$ ; 水平线性 $\leq 0.4\%$ ; 动态范围 30 dB
综合性能	信噪比 $> 16 \text{ dB}$ ; 检测重复性 $< 1 \text{ dB}$ ; 检测稳定性 $< 1 \text{ dB}$ ; 漏报率=0; 误报率=0; 管端不可探测区(盲区) $\leq 50 \text{ mm}$

## 6 结语

通过钢管生产现场的实际应用,表明超声波自动检测系统所确定的鉴定方法是可行且有效的。达到了API 5L/ISO3183标准规定的系统检验能力。同时也达到了规范设备鉴定方法、控制钢管产品质

(下转第62页)

## 4.2 试验 2

对于第二组 4 个试样,施加频率为 10 Hz 的正弦激励电压,同样重复采集 20 次。取得巴克豪森噪声信号均方根的平均值,如表 3 所示。试样 6,7,9 的均方根值保持如试验 1 中的规律,随有效硬化层深增加而减小;然而试样 8 的数据出现反常现象,反而比层深更深的 9 号试样的均方根值小。由于此 4 个试样的马氏体、奥氏体、碳化物等指标依然相似,且 8 号与 9 号试样的硬度值相当,仅仅是晶间氧化物尺寸存在较大差异。对此,Davut 曾在 2007 年提出 MBN 信号包络线的峰值随着材料微观组织中球状渗碳体的含量增加而减小;Moorthy 在 1997 年也得出层状渗碳体组织的钉扎能力远弱于球状渗碳体的结论<sup>[7]</sup>,故推测当晶间氧化物尺寸增大时,相当于层状渗碳体组织球状化,导致钉扎能力的增强,从而阻碍磁畴翻转,导致巴克豪森噪声信号特征值的减小。

表 3 第二组 4 个试样的参数指标

编号	晶间氧化物 /mm	有效硬化层深 /mm	表面硬度 /HRC	均方根
6		2.673	58.01	4.9
7		2.862	56.62	4.7
8	0.03	4.177	58.36	2.74
9	0.0175	4.322	58.19	3.4

## 5 结语

采用巴克豪森噪声检测的方法,试验论证了巴克豪森噪声信号与齿轮材料 18CrNiMo7-6 钢的渗碳有效硬化层深度之间的关系,得到了以下结论:

(1)在硬度、马氏体含量、奥氏体含量、碳化物

含量等指标近似的情况下,巴克豪森噪声信号特征值(如均方根、均值、峰-峰值等)随着 18CrNiMo7-6 钢渗碳的有效硬化层深度的增大而减小。

(2)由于渗碳后铁磁性材料微观结构中的球状渗碳组织的钉扎能力远强于层状渗碳体组织,故可认为晶间氧化物的尺寸也会影响巴克豪森噪声的幅值。

## 参考文献:

- [1] 李光瑾,叶俭,祝兵寿,等. 渗碳齿轮有效硬化层深度的确定和和齿轮疲劳强度试验方法[J]. 柴油机设计与制造,2010,16(3):36-41.
- [2] 李学伟. 关于渗碳齿轮有效硬化层的讨论[J]. 煤矿机械,2003(2):33-34.
- [3] 周尚臣,钟国欣,吴辉. 渗碳齿轮的接触疲劳与渗碳层深度[J]. 一重技术,2002(4):36-38.
- [4] TITTO K. Use of Barkhausen effect in testing for residual stresses and material defects[J]. Nondestructive Testing Australia,1989,26(2):458-467.
- [5] JAGADISH C, CLAPHAM L, ATHERTON D L. Influence of uniaxial elastic stress on power spectrum and pulse height distribution of surface Barkhausen noise in pipeline steel[J]. Magnetics IEEE Transactions,1990,26(3):1160-1163.
- [6] 封珂,朱百智,郭祺龙,等. 18CrNiMo7-6 和 20CrNi2Mo 钢渗碳工艺参数优化与应用[J]. 金属热处理,2010(6):63-66.
- [7] SUVI Santa-aho, MINNAMARI VIPPOLA, AKI SORSA, et al. Development of Barkhausen noise calibration blocks for reliable grinding burn detection[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012 (212):408-416.

(上接第 32 页)

量的目的。系统的主要性能指标及鉴定方法可供钢管焊缝超声波自动检测系统能力的鉴定提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] API Spec 5L/ISO3183 Specification for Line Pipe

[S].

- [2] DNV-OS-F101 - 2010 Submarine Pipeline System [S].
- [3] SHELL DEP. 31. 40. 20. 37 - Gen. Line Pipe for Critical Service ( Amendments/ Supplements to ISO3183;2007)[S].