

# 水平连铸圆钢超声检测结果的信号处理\*

左建国

(衡阳钢管厂 衡阳 421001)

1997年4月8日收到

**摘要** 水平连铸圆钢为多晶种的不均匀粗晶材料。当采用超声波对其进行检测时,将产生较强的组织散射噪声,从而使得对缺陷回波的判断与评价无法进行。本文采用分离频谱的方法对原始检测信号进行处理,再用截止频率法对缺陷回波进行恢复运算。实验结果表明,本文所采用的方法能较为有效地消除原始检测信号中的组织噪声,从而提高超声检测的信噪比。

**关键词** 水平连铸圆钢, 超声检测, 组织噪声, 信号处理

## Signal processing of the ultrasonic testing results on HCC round steel billets

Zuo Jianguo

(Hengyang Steel Tube Mill, Hengyang 421001)

**Abstract** Horizontally-Continuously-Cast (HCC) round steel billet is a kind of coarse grained material with multicrystals and inhomogeneity. Strong structure-scattered noise will occur when it is tested with ultrasonic waves; this fact makes it impossible to evaluate the flaw echoes. In this paper, the Split-Spectrum technique together with a Cut-Off Frequency algorithm is employed to process the original testing signals and to extract the flaw echoes. Experimental results show that the technique employed can eliminate the structural noise efficiently and hence enhance the signal-to-noise ratio of the ultrasonic testing.

**Key words** HCC round steel billet, Ultrasonic testing, Structural noise, Signal processing

### 1 引言

水平连铸圆钢的组织为铸态组织,其不均匀性表现在纵、横两个方向上。从其横断面来看,其组织结构有如图1所示的三个晶粒区:最外层为等轴细晶粒区,在该区组织致密、晶粒较细且比较均匀;中心为粗大的等轴晶粒区,在这一区域不但晶粒粗大,且常有中心疏松、

残余缩孔及非金属夹杂等缺陷存在;上述两区之间为粗长的柱状晶粒区,这一区域构成了水平连铸圆钢内部组织的主要特征,其晶粒的形状、大小及长度等因素在沿轴各断面上是不相同的,在径向上也是随机变化的。在这一区域的常见缺陷有:一般疏松、非金属夹杂、气泡及中间裂纹等。

\* Swedish Institute 奖学金及国家非教育系统留学回国人员 B 类经费资助项目

水平连铸圆钢作为生产高质量的无缝钢管的原材料，上述大部分缺陷是不允许存在的，必须检测出来并予以剔除。然而，由于前述特殊的组织结构，当采用超声波进行检测时，必然会产生较强的组织散射噪声，且这种噪声的强度和特征将随着超声波的波型、频率及声波传播方向等多种因素而变化，从而给超声检测带来困难。因此，有必要对超声检测的结果进行信号处理，以达到抑制噪声、提高信噪比、从而对缺陷回波作出较正确评价的目的。

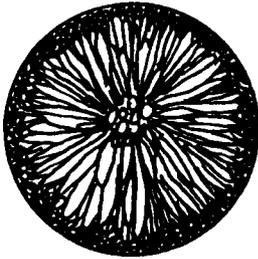


图1 水平连铸圆钢断面的组织结构

在众多的信号处理方法中，分离频谱法<sup>[1]</sup>的研究与应用较为广泛。其常规恢复算法有最小值法和极性阈值法两种<sup>[2]</sup>，但这两种算法受诸多因素的限制，例如需要精确地选择或设置若干重要参数<sup>[3,4]</sup>，且当检测信号中的噪声幅度大于或接近于缺陷回波幅度时不能起到有效的降噪作用等<sup>[5]</sup>。在有些情况下，它们甚至将缺陷回波连同噪声一起消除掉了<sup>[6]</sup>，这无疑将影响对材料的正确评价。

针对上述情况，本文作者提出了一种新的恢复算法——截止频率法<sup>[6,7]</sup>。这种算法克服了上述常规算法的不足，简便易用。本文对水平连铸圆钢超声检测中组织噪声的干扰问题，采用该方法对正入射纵波检测和斜入射横波检测的原始信号进行处理，得到了较好的效果。

## 2 实验原理

材料的组织散射与材料的晶粒大小、不均匀性的程度及超声波的频率密切相关<sup>[1]</sup>。材料的晶粒越粗大、各向异性越严重、超声波的频率越高，组织噪声就越强烈。因此，对于一应用声学

定的材料而言，材料的组织散射噪声在外因上主要取决于检测用超声频率。当检测频率改变时，组织噪声的幅度、相位等都要发生显著的变化。而缺陷对超声波的反射除了与检测频率有关外，还与缺陷本身的性质、形状和大小等因素有关，缺陷回波的幅度和相位等重要参数随检测频率变化而改变的程度远不如组织噪声那么大。基于这一原理，Newhouse等人提出了分离谱技术来处理粗晶材料的超声检测信号，其工作原理如图2所示<sup>[1,2]</sup>。图中， $X(t)$ 为原始的检测用时域信号，FFT为快速傅里叶变换， $f_1 - f_n$ 为 $n$ 个高斯滤波窗，IFFT为快速傅里叶逆变换， $X_1(t) - X_n(t)$ 为分离后的时域信号， $y(t)$ 为最终输出结果。

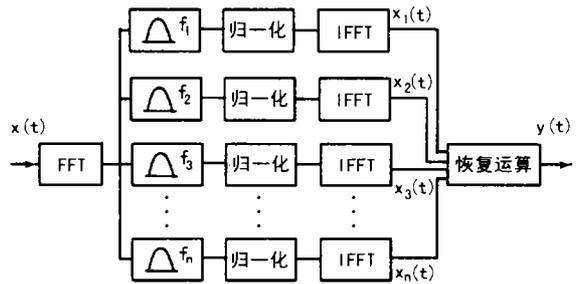


图2 分离谱原理

在上述过程中，重要的一环是信号的恢复，本文采用的截止频率法<sup>[6,7]</sup>基本原理如下：

在 $X_1(t) - X_n(t)$ 这 $n$ 个分离信号中所包含的组织噪声在任一时刻 $t$ 均有不同的幅度和相位，而同一缺陷回波在这些分离信号中则基本相同，所以，如果不存在缺陷回波的话，任一时刻所有分离信号不应有相同的极性；而如果存在缺陷回波，则在缺陷回波出现的时刻，即使不是所有分离信号具有相同的极性，也至少有一连续的分信号序列具有相同的极性。基于这一特征，我们可将原始检测信号分离成任意个子信号，而在这些子信号中随时搜寻是否有连续具有相同极性的分离信号序列。如果有，则将其迭加作为缺陷回波信号输出，即：

$$y(t) = \sum_{m=i}^{m=j} X_m(t) \quad (1)$$

式中,  $X_m(t)$  为  $t$  时刻第  $m$  个分离信号,  $i, j$  分别对应于该连续具有相同极性的分离信号序列的起始序号和终止序号, 则

$$\Delta f = f_j - f_i \quad (2)$$

为输出信号的频带宽度,  $f_i$  和  $f_j$  分别为其低频端和高端的截止频率。

在上述过程中, 式 (2) 中的截止频率  $f_i$  和  $f_j$  决定了式 (1) 表示的最终输出结果, 而它们本身又由分离信号中连续具有相同极性的分离信号序列的起点和终点所确定。在本文的研究工作中, 我们将按以下方式来确定它们的值:

(1) 求出回波信号持续时间内各时刻的  $f_{it}$  和  $f_{jt}$ , 代入式 (2) 得出不同时刻的瞬时值  $\Delta f_t$ ;

(2) 以所有  $\Delta f_t$  值中的最小者为输出信号的频带宽度, 以检测换能器的标称频率为原始信号的中心频率, 确定最终截止频率  $f_i$  和  $f_j$ 。

### 3 实验装置及实验方法

#### 3.1 实验装置

实验装置如图 3 所示。检测换能器为 5MHz 的纵波直探头。超声探伤仪获得的原始检测信号经 A/D 块数字化后送入 486 微机作分离频谱处理及截止频率法恢复运算, 最终处理结果用激光打印机打印出来。

#### 3.2 试样及实验方法

从直径为 120mm 用于钢管生产的水平连铸圆钢上截取若干段无缺陷的试样, 在试样上制人工缺陷来进行超声检测。

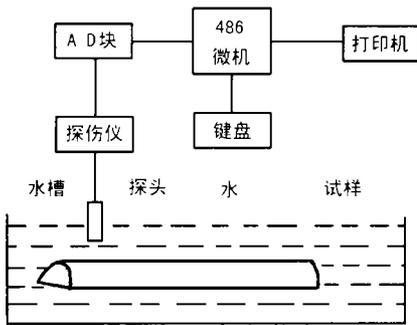


图 3 实验装置

#### 3.2.1 平底孔试样

将一段水平连铸圆钢试样沿其轴线锯切为两半, 在其中一半的中点处垂直钻一深度约为 25mm 的  $\phi 2$  平底孔。试样外圆为探测面, 则平底孔的检测深度约为 35mm。

将试样置于图 3 所示实验装置的水槽中, 检测换能器垂直于试样锯切面并沿其轴线方向扫查可探测到试样中的平底孔。

#### 3.2.2 横通孔试样

将制作平底孔试样时锯切的另一半制成“梯形”状, 在其侧面钻两个直径分别为 2mm 和 3mm 而间距为 30mm 的横通孔来模拟“横向缺陷”(指垂直于轴向且在横截面上某一方向有一定延伸的缺陷)。试样上圆弧面为探测面, 横通孔距探测面的距离为 30mm。

如图 4(a) 所示。实验时, 检测换能器以倾斜  $15^\circ$  的角度(即声波在水中的入射角  $\alpha$ ) 沿试样轴线方向扫查, 以模拟水平连铸圆钢中横向缺陷的横波检测。

#### 3.2.3 短横孔试样

对于直径为 120mm 的水平连铸圆钢来说, 由下式<sup>[8]</sup>

$$h_m \leq \frac{D}{2} \left(1 - \frac{C_s}{C_l}\right) \quad (3)$$

计算, 可得横波检测“径向缺陷”(指垂直于横截面且在轴向有一定延伸的缺陷)的最大有效检测深度约为 24mm(式 (3) 中,  $h_m$  表示最大检测深度,  $D$  为试件直径,  $C_s$  和  $C_l$  分别是钢中的横波声速和纵波声速)。本实验中取检测深度为该值的一半, 即在圆钢试样表面下 12mm 处沿平行于试样轴线方向钻一个直径为 2mm 的短横孔(钻入深度为 10mm)来模拟径向缺陷。为避免端面反射的影响, 短横孔钻在宽度为 10mm 的斜槽内(如图 4(b) 所示)。实验时, 检测换能器不动, 试样原地旋转。为了便于缺陷回波的识别, 在试样相对于换能器的旋转过程中, 使换能器发射的声波在每一转内只对短横孔扫查一次, 亦即此时的最大检测深度为 12mm。与此相对应, 声波在水中的入射角  $\alpha$  约  $21^\circ$ 。

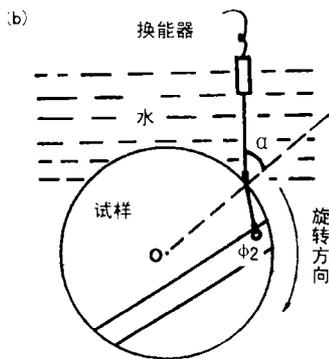
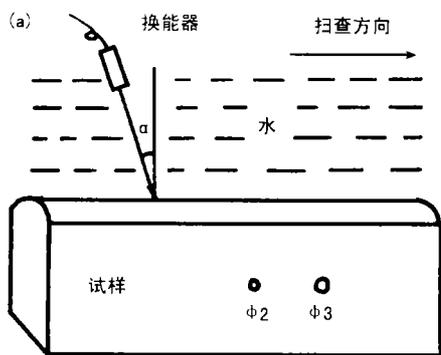


图 4 横孔及其探测方式

(a) 横通孔 (b) 短横孔

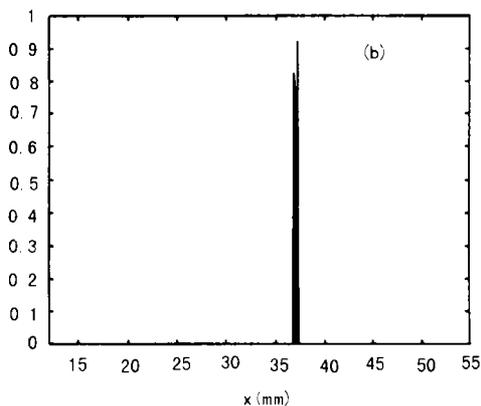
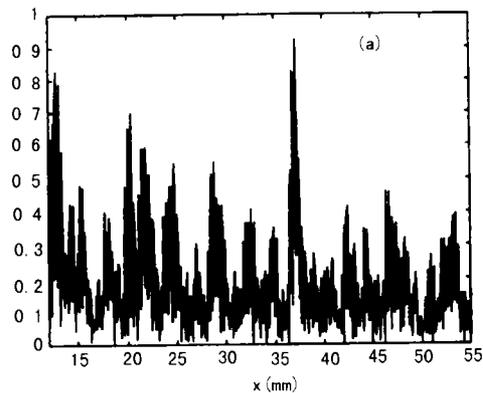


图 5  $\phi 2$  平底孔超声纵波检测结果

(a) 原始信号 (b) 重建信号

## 4 实验结果

实验结果如图 5- 图 7 所示。其中，图 5 为  $\phi 2$  平底孔超声纵波检测的实验结果，图 6 为横通孔超声横波检测实验的 B 扫描图象，图 7 为短横孔超声横波检测的实验结果。由于水浸法检测时超声纵波入射到试样表面将产生界面回波，为了能够清楚地观察缺陷回波，同时也为了有效地显示材料的组织噪声，我们在超声探伤仪的设置及信号采集时，去掉了水声程、界面回波以及试样外层细晶区组织噪声不太强的一段声程，而仅取人工缺陷回波附近的一段。

所述各图中，横坐标为材料中声波的传播距离，亦即声程。对于 A 扫描图象，纵坐标为信号的归一化幅度；对于 B 扫描图象，纵坐标则表示检测换能器沿试样轴向的扫描距离。

主要实验参数如下：采样频率为 40MHz，采样点数为 814 点，高斯滤波窗的个数为 25。

由图 5 可见，尽管平底孔有较强的反射回波，但由于组织噪声强烈，原始检测信号的信噪比较低，加之噪声具有与缺陷回波类似的波形，因此要区分缺陷回波与组织噪声是比较困难的，对于自然缺陷来说更是如此。

对于横向缺陷的横波检测来说，由图 6(a) 所示的 B 扫描图象中，不论是  $\phi 2$  横通孔还是  $\phi 3$  横通孔，其图象都不太明显，难以清楚地辨别出来。并且，由图 7(a) 所示的径向缺陷横波检测的 A 扫描图象，我们还可以看到横波检测时组织噪声与纵波检测时的组织噪声具有明显不同的特点，即众多柱状晶粒对超声横波散射的结果形成了典型的声波干涉图形，而缺陷回波则相当于一个孤立的冲击波。

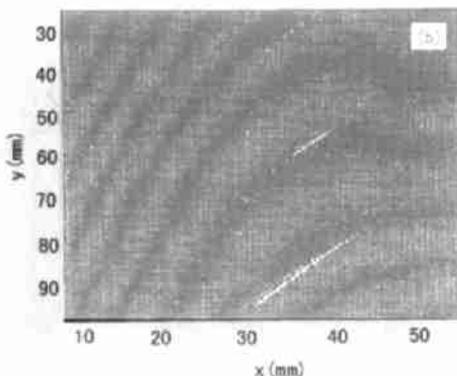
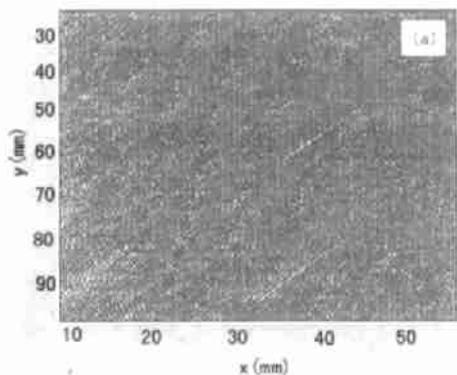


图6 横向缺陷(通孔)超声横波检测结果  
(a) 原始信号 (b) 重建信号

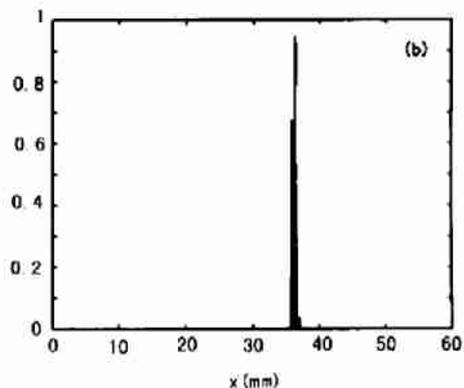
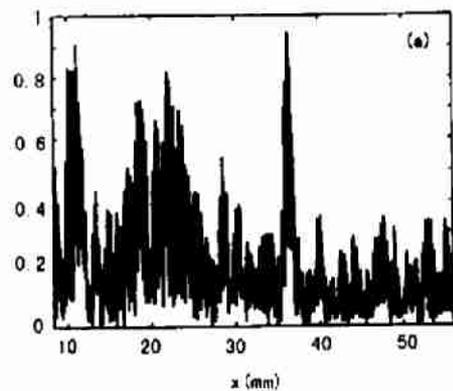


图7 径向缺陷(短横孔)超声横波检测结果  
(a) 原始信号 (b) 重建信号

无论是纵波检测还是横波检测,图5(b)、图6(b)和图7(b)所示的图象均说明本文所采用的信号处理方法不但可较好地消除组织噪声的影响,还能保持缺陷回波的幅度和波形或图象基本不变,尽管在图6(b)所示的B扫描图象中还有少量的组织噪声存在,但两个横通孔的图象都非常清晰地显示出来了,我们可以容易地对其作出正确的判断。

## 5 结论

对于水平连铸圆钢这种具有特殊组织结构的材料,我们可采用垂直入射超声纵波检测法来探测其中诸如缩孔、夹杂等体积型缺陷,斜入射超声横波检测法来探测其中的横向缺陷和表面下的径向缺陷,但不论采用哪种波型,均会产生较强的组织噪声,因此,必须对检测结果进行必要的信号处理来提高信噪比从而达到正确评价材料的目的。

从本文的实验结果来看,截止频率法能够较好地抑制组织噪声并重建缺陷回波信号(图象),这说明它有可能成为处理粗晶材料超声检测结果的有力工具之一。

## 参 考 文 献

- 1 Newhouse V L, Bilgutay N M, Sanjie J, et al. *Ultrasonics*, 1982, 20(2): 59-68.
- 2 Rose J L, Karpur P, Newhouse V L. *Material Evaluation*, 1988, 46(1): 114-122.
- 3 Karpur P, Shankar P M, Rose J L, et al. *Ultrasonics*, 1987, 25(4): 204-208.
- 4 Karpur P, Shankar P M, Rose J L, et al. *Ultrasonics*, 1988, 26(4): 204-209.
- 5 Ericsson L. *Reduc. Mater. Noise. Ultra. Synth. Freq. Div. Algor.*, Uppsala University, 1994.
- 6 左建国. 无损检测(待发表).
- 7 左建国. 全国无损检测学会第二届青年学术交流会论文集, 上海: 中国机械工程学会无损检测学会, 1997. 1-5.
- 8 北京技术交流站. 超声波探伤原理及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1982. 260-263.