

# 镍铜合金棒材超声波检测方法

刘英和,蔡诗瑶,范铁铮,王 洋

(天津市友联螺旋钢管有限公司,天津 301606)

**摘要:**镍铜合金棒材中心部位存在的缩孔、夹渣类缺陷是棒材断裂的主要因素,提出的超声波探伤方法最大限度减少了横波探伤的盲区,提高了缺陷检出率。

**关键词:**扫描基线;组合始波宽度;近场长度;等效试块

中图分类号:TG115.28 文献标志码:A 文章编号:1000-6656(2013)09-0035-03

## Ultrasonic Testing Method for Nickel and Copper Alloy Bars

LIU Ying-He, CAI Shi-Yao, FAN Tie-Zheng, WANG Yang

(Tianjin Youlian Spiral Pipe Co Ltd, Tianjin 301606, China)

**Abstract:** Flaws such as shrinkage cavity and slag inclusion in the center of nickel and copper alloy bars are the major factor causing the fracture. The proposed ultrasonic testing method minimizes dead zone of transverse wave detection and raises detection rate of defects.

**Keywords:** Scan base line; Combination initial pulse width; Near field length; Equivalent test block

## 1 存在问题

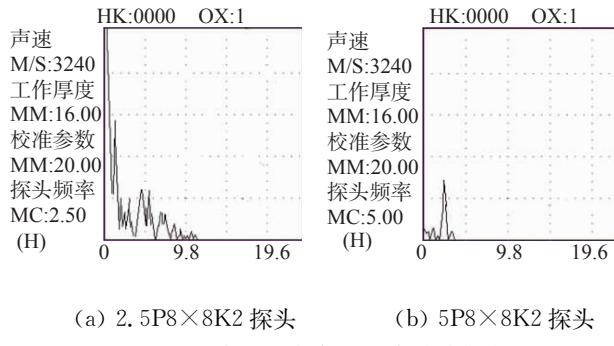
常用镍铜合金棒材有  $\phi$  17.4 mm,  $\phi$  22.2 mm,  $\phi$  25.4 mm,  $\phi$  31.5 mm 等四种规格, 超声波探伤时使用 CSK- I A 型标准试块校准 2.5P8×8K2 横波探头的前沿与 K 值及扫描基线, 探伤时棒材中心的缩孔、夹渣类缺陷常出现漏检。笔者提出的超声波探伤方法最大限度减少了横波探伤的盲区, 提高了缺陷检出率。

## 2 原因分析

## 2.1 小晶片探头(9 mm×9 mm 以下)频率

超声波的频率取决于压电晶片的厚度,厚度越薄频率越高。图1是2.5P8×8K2和5P8×8K2探头与探伤仪器组合始波宽度,比较后不难看出,压电晶片面积相同,频率不同,仪器与探头的组合始脉冲宽度不同(仪器自身始脉冲宽度固定不变,而仪器探头的组合始脉冲宽度主要受超声波频率影响)。

镍铜合金棒材加工程序为浇铸锭、开坯、轧制、



(a) 2.5P8×8K2 探头 (b) 5P8×8K2 探头

拉拔,依据铸件的特点、圆心部位为缺陷较为集中的区域。以  $\phi 17.4$  mm 棒材为例,半径为 8.7 mm,参考图 1,2.5P8×8K2 探头与探伤仪器组合始波宽度已经占到仪器扫描基线 9.8 mm 的位置,棒材圆心位置 8.7 mm 附近的缺陷反射回波全部裹在仪器与探头组合始波宽度之内而无法分辨,此即为出现缺陷漏检的原因之一,因此应选用频率较高的探头。

## 2.2 距探头 $1.64N$ ( $N$ 探头近场长度) 处对探伤的影响

### (1) 声压分布的影响

参考图2,从超声场横截面声压分布情况来看,声源附近的声波存在极大与极小值不利于探伤,当

超声波传输到  $N/2$  时主声束上的声压是零,图中 A、B 位置的声压较高但不利于缺陷定位。当超声波传输到  $N$  的位置时超声波的能量逐渐开始向主声束集中,当超声波传输到  $1.64N$  的位置时超声波的能量集中在主声束上(C 点位置),此点声的能量最高,指向性最好,也最有利于发现缺陷。探伤时如能将容易出现缺陷的位置落在  $1.64N$  的附近,缺陷检出概率将明显增加。

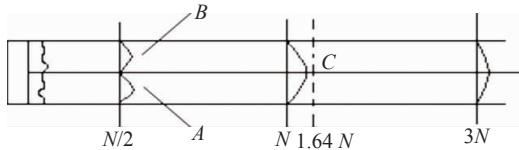


图 2 超声场声压分布示意图

(2) 不同介质(探头斜楔与被检棒材)对近场长度的影响

横波探头近场区长度计算公式为:

$$N = a \times b \times \cos\beta / \pi \times \lambda \times \cos\alpha \quad (1)$$

式中: $a, b$  为压电晶片的边长; $\lambda$  为波长; $\beta$  为横波折射角度; $\alpha$  纵波入射角度。

横波探头斜楔中占有近场区长度  $N''$  的计算公式为:

$$N'' = L \tan\alpha / \tan\beta \quad (2)$$

式中: $L$  为超声波在探头斜楔中走过的距离。

不同斜楔材质(有机玻璃与聚峰材质)与  $K$  值及余弦三角函数、正切三角函数的比值见表 1。

表 1 不同斜楔材质的  $\cos\beta/\cos\alpha$ 、 $\tan\alpha/\tan\beta$  与  $K$  值的关系

$K$ 值	$\cos\beta/\cos\alpha$		$\tan\alpha/\tan\beta$	
	有机玻璃	聚峰	有机玻璃	聚峰
1.0	0.88	0.83	0.75	0.62
1.5	0.78	0.704	0.66	0.52
2.0	0.68	0.6	0.58	0.44
2.5	0.6	0.51	0.50	0.38
3	0.52	0.44	0.44	0.33

横波探头斜楔中占有近场区长度  $N''$  的计算过程:

以使用  $2.5P8 \times 8K2$  聚峰材质斜楔横波探头为例, $K$  值即  $\tan\beta$  等于 2,因此有  $\beta=63.44^\circ$ 。

通过表 1 可查出  $K=2$  时  $\tan\alpha/\tan\beta=0.44$ ,由此得  $\alpha=41.35^\circ$ 。

$$\lambda = c_s/f = 3.24/2.5 = 1.3 \text{ mm}$$

式中: $c_s$  为横波声速; $f$  为超声频率。

从图 3 得: $\tan\alpha=L_1/4$ ,则  $L_1=\tan 41.35^\circ \times 4 \text{ mm}$

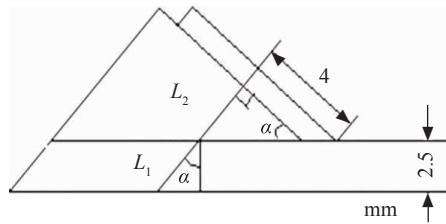


图 3 横波斜探头中斜楔结构示意

$$=3.52 \text{ mm}.$$

$\cos\alpha=2.5 \text{ mm}/L_2$ ,  $L_2=2.5 \text{ mm}/\cos 41.35^\circ=3.33 \text{ mm}$ , 超声波在探头斜楔内的声程  $L=L_1+L_2=6.85 \text{ mm}$ , 探头内部占有的近场长度  $N''$  由式(2)计算得  $3.02 \text{ mm}$ 。

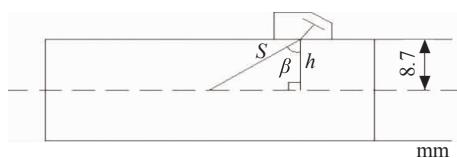
以  $\phi 17.4 \text{ mm}$  镍铜合金棒材为例分析  $1.64N$  所处的位置:

计算  $2.5P8 \times 8K2$  聚峰材质斜楔横波斜探头的近场长度得  $N$  为  $9.4 \text{ mm}$ ,  $1.64N$  则为  $15.42 \text{ mm}$  (晶片边长为  $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ )。

通过图 4 可知声程  $S=8.7 \text{ mm}/\cos\beta=8.7 \text{ mm}/\cos 63.44^\circ=19.33 \text{ mm}$ 。

$1.64N$  在图 4 声程  $S$  中所占有的长度  $N'=1.64N-N''=12.4 \text{ mm}$ ,  $N'$  对应的深度  $h'=\cos\beta \times N'=5.54 \text{ mm}$ , 与图 4 中的  $h$  相差  $8.7 \text{ mm}-5.54 \text{ mm}=3.16 \text{ mm}$ 。

$$N'=12.4 \text{ mm}, S-N'=6.93 \text{ mm}.$$

图 4  $\phi 17.4 \text{ mm}$  镍铜合金棒材探伤模拟示意

上述分析说明超声波指向性最好,能量最集中,最有利于发现缺陷的声场位置的  $1.64N$  不在  $\phi 17.4 \text{ mm}$  棒材缺陷较为集中的圆心位置,此即为被检棒材出现缺陷漏检的原因之二。

(3) 规格  $2.5P8 \times 8K2$  探头与 CSK-I A 型校准试块对灵敏度的影响

超声波探伤属于接触式探伤,所用探头与校准试块及被检工件的耦合效果将直接影响探伤灵敏度。 $2.5P8 \times 8K2$  探头与 CSK-I A 型校准试块均为平面,而被检棒材的曲率半径  $R$  为  $8.7 \text{ mm}$ ,很显然用平面探头与平面试块的校准结果检测曲率较大的棒材工件是不合适的,这即是出现缺陷漏检的原因之三。

### 3 解决问题的方案

通过前述分析可知出现缺陷漏检的因素主要是仪器与探头组合始脉冲宽度过宽,声场最佳位置 $1.64N$ 不在缺陷密集区,探头与校准试块的选用不合理。

根据超声波的基本知识可知提高超声波的频率可以有效地改变组合始脉冲宽度,同时也可以在较高频率的情况下通过改变压电晶片尺寸或折射角度 $\beta$ 来改变 $1.64N$ 的位置,根据等效试块的原理可以使用被检棒材设计制作等效校准试块。

#### 3.1 解决问题的思路

针对 $\phi 17.4$  mm 镍铜合金棒材,以规格 $5P6 \times 6K1.5, R8.7$ (轴向曲率)聚峰材质斜楔横波斜探头检测作如下分析:

(1) 通过上述分析可知, $K=1.5$  横波折射角度 $\beta=56.31^\circ$ 。通过表 1 查得此时  $\tan\alpha/\tan\beta=0.52$ ,纵波入射角度 $\alpha=38^\circ$ 。

(2) 参考图 3 与 2.2 的计算方法可知, $L_1=\tan 38^\circ \times 3 \text{ mm} = 2.64 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 2.5 \text{ mm}/\cos 38^\circ = 3.17 \text{ mm}$ ,  $L=L_1+L_2=5.87 \text{ mm}$ ,  $N''=L\tan\alpha/\tan\beta=5.87 \text{ mm} \times 0.52=3.05 \text{ mm}$ 。

$5 \text{ MHz}$  横波探头波长  $\lambda=c_s/f=3.24/5.0=0.65 \text{ mm}$ ;

$5P6 \times 6K1.5, R8.7$  规格探头近场长度  $N$  按式(1)计算得  $12.424 \text{ mm}$ ,  $1.64N=20.38 \text{ mm}$ 。

(3) 以入射点为基准分析  $1.64N$  在图 4 声程  $S$  中所处的位置  $N'$  及对应深度  $h'$ :

$1.64N$  在图 4 声程  $S$  中所占有的长度  $N'=1.64N-N''=17.33 \text{ mm}$ ;

对应深度  $h'=\cos 56.31^\circ \times 17.33 \text{ mm}=9.6 \text{ mm}$ ;

与图 4 中的  $h$  相差  $9.6 \text{ mm}-8.7 \text{ mm}=0.9 \text{ mm}$ ( $2.5P8 \times 8K2$  规格探头相差  $3.16 \text{ mm}$ )。

$5P6 \times 6K1.5, R8.7$  规格探头在图 4 中声程  $S=h/\cos 56.31^\circ=15.68 \text{ mm}$ ,  $N'-S=17.33 \text{ mm}-15.68 \text{ mm}=1.65 \text{ mm}$ ( $2.5P8 \times 8K2$  规格探头相差  $6.93 \text{ mm}$ )。

声场最佳位置  $1.64N$  基本在棒材缺陷密集的圆心位置,这说明使用  $5P6 \times 6K1.5, R8.7$  横波斜探头检测规格 $\phi 17.4$  mm 镍铜合金棒材较为合适。

同理规格 $\phi 22.2$  mm 镍铜合金棒材使用  $5P6 \times 6K2, R11.1$  mm 横波斜探头,规格 $\phi 25.4$  mm 镍铜

合金棒材使用  $5P6 \times 6K1, R12.7$  mm 横波斜探头,规格 $\phi 31.5$  mm 镍铜合金棒材使用  $5P8 \times 8K1, R15.75$  mm 横波斜探头较为合适(计算过程略)。

#### 3.2 等效校准试块

##### (1) 设计与制做

镍、铜合金棒材表面轴向曲率与 CSK-I A 型标准校准试块有较大区别,为保证扫描基线或  $K$  值校准的准确性以及改善耦合效果提高检测灵敏度,用镍、铜合金棒材按图 5 制做双孔法等效校准试块,试块测试面的曲率半径与被检棒材曲率半径相同,两个间隔距离一定,不同深度相同孔径的测试孔孔径为 $\phi 1.0$  mm,见图 5(孔径越小测试精度越高,不同规格镍、铜合金棒材要分别制作等效校准试块)。

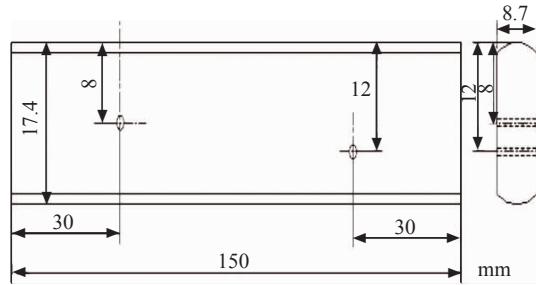


图 5 双孔法等效校准试块

##### (2) 试块的使用方法

使用  $5P6 \times 6K1.5, R8.7$  轴向曲率探头分别扫查该校准试块上两个不同深度的测试孔,分别找到两个测试孔反射回波最高点后测量出两孔法线到探头外壳前端的距离,将测量的距离值分别输入到 CBC-100 型数字式超声波探伤仪中(具有双孔法自动校准功能)仪器自动完成扫描基线、探头  $K$  值与前沿校准。

(3) 图 6,7 为使用同一台 CBC-100 型数字式超声波探伤仪,分别使用  $2.5P8 \times 8K2$  探头与  $5P6 \times 6K1.5, R8.7$  轴向曲率横波斜探头,分别检测规格

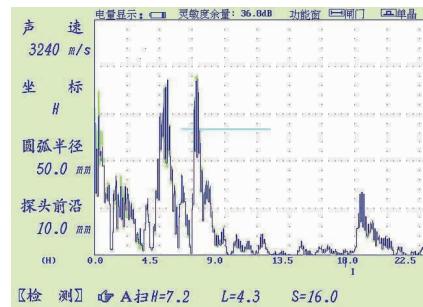


图 6  $2.5P8 \times 8K2$  探头检测结果

(下转第 51 页)

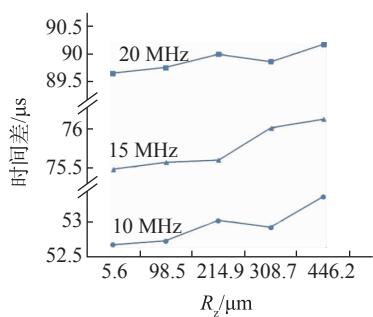


图3 不同频率,不同粗糙度下  
底面回波与初始脉冲的时间差

使其在样品中传播声程不同是造成上述结果的主要原因。在粗糙度增大的情况下,声波入射到表面凹陷处时比入射到凸出处传播的声程更长,水的声速小于钢的声速,因而造成了波峰位置在时间轴线上相应的后移。

4 结论

(1) 在核电压力管道超声波测厚过程中,由于现场操作不当、管道材质具有缺陷以及表面粗糙度过大等,均有可能导致测厚数据异常。因此在检测中要进行规范操作,在测厚仪读数异常时应更换检测位置,清理表面污渍后重新进行检测。

(2) 在表面粗糙度较大的情况下,即使能够获

得稳定的测厚回波信号,回波也会发生展宽致使波峰辨识度降低,测厚结果准确度下降;同时回波波峰也会发生延迟,从而进一步导致测厚结果偏离准确值。因此在测厚时要特别注意被检工件的表面粗糙度情况,尽量选择平整光滑的表面进行检测,必要时应打磨处理后,再进行测厚。

#### 参考文献：

- [1] 廖民飞,史素梅.探讨管道壁厚准确测量方法[J].控制与测量,2000(3):43-44.
  - [2] SHUTTLEWORTH P, MAUPIN J, TEITSMA A. Gas coupled ultrasonic measurement of pipeline wall thickness[J]. Pressure Vessel Technol, 2005, 127(3): 290.
  - [3] 柯细勇,王占元,杨剑锋,等.一种新型便携超声波测厚仪的设计[J].传感器与微系统,2011,30(12): 119-125.
  - [4] 张建中,时耿海.超声波测厚中指示值失真原因分析[J].无损探伤,2007,31(1):34-35.
  - [5] 于宝虹,罗云东,邵志航.在役金属管道壁厚检测方法的应用性分析[J].炼油与化工,2005,16(2):34-35.
  - [6] 林莉,李喜孟.超声波频谱分析技术及应用[M].北京:机械工业出版社,2009:65-76.
  - [7] 朱哲民,龚秀芬,杜功焕.声学基础[M].南京:南京大学出版社,2001:388-414.

(上接第 37 页)

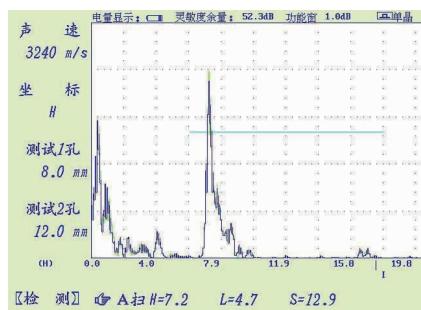


图 7 5P6×6K1.5,R8.7 轴向曲率探头检测结果

$\phi 17.4$  mm镍铜合金棒材中深度为 7.2 mm 的同一缺陷的结果比较。通过图 6.7 可以看出不同规格探

头的检测结果不同。

4 结论

横波探伤过程中如能依据被检工件的材质、几何形状、制造特点正确选择探头频率、压电晶片尺寸与  $K$  值,尽量保证横波探头的  $1.64N$  处在被检工件的缺陷密集区,最大限度地缩小“组合始波宽度”将有效提高缺陷检出率与信噪比。同时应尽量保证选用探头的轴向曲率半径与被检棒材的轴向曲率半径相同,在现有标准校准试块与对比试块均无法满足探头前沿、 $K$  值、扫描基线校准的情况下,利用等效试块的原理设计、制作等效校准试块,改善耦合条件是保证检测灵敏度的重要因素。