

管子探伤中聚焦声束在管外壁覆盖区上入射角的讨论*

沈 华 亚

(第一机械工业部机电研究所)

—

利用聚焦声束、横波波型对管材进行探伤已为无损检验人员所熟悉。聚焦探头与管子之间的配置,常采用使聚焦声束在水中的焦点落在与声束相垂直的直线上^[1,2]。至于聚焦声束在管外壁覆盖区上的入射角行为也已见报道,但未见到详细的讨论^[1,3]。

用超声波对管子内外壁纵向缺陷进行检验时,习惯上都已经应用超声横波波型,而在管内实现横波波型的方法则是利用不同介质分界面上的波型转换。亦即在对管子进行检验时是利用水和管子交界面上的纵波波型和横波波型间的转换。由于管子的形状,致使平面声波射至管壁时在管内将会发生不只是一种波型,因此,为在管内得到纯横波折射¹⁾。

必须使得管材表面的所有声束都落在一定的入射角范围内。

对于壁厚 $t < 0.45 R$ 的管子来说,用横波方法检验纵向缺陷时,其入射角 α 必须满足:

$$\sin^{-1} \frac{v_w}{v_s} \frac{r}{R} > \alpha > \sin^{-1} \frac{v_w}{v_l} \quad (1)$$

式中 v_w 为水中声速(取 1.48×10^6 毫米/秒), v_l 为管中纵波声速(取 5.85×10^6 毫米/秒), v_s 为管中横波声速(取 3.23×10^6 毫米/秒), r 为管子内半径(毫米), R 为管子外半径(毫米)。如图1所示。

为了使聚焦声束在管外壁入射角满足(1)式,一般都采用调整偏轴距 L ,在随后的公式推导中可以看到:即使聚焦声束的中心轴线上的入射角能满足(1)式,还需配合一定的条件才能使聚焦声束中的所有入射角都满足(1)式。

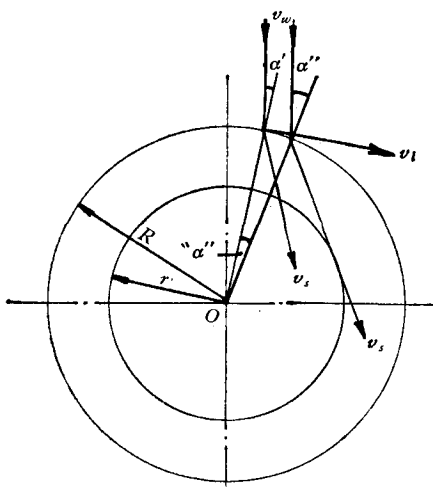


图1 入射角参数及入射角窗口“ α ”

$$\alpha' = \sin^{-1} \frac{v_w}{v_l}; \quad \alpha'' = \sin^{-1} \frac{v_w}{v_s} \frac{r}{R}$$

二

管子探伤中允许的 $\alpha_{\text{最大}}$ 和 $\alpha_{\text{最小}}$ 之间的差是很小的。例如:管子的 t/R 比为 0.42 时的

* 1977年1月10日收到。

1) 忽略声波导。

$\alpha_{\text{最大}} - \alpha_{\text{最小}}$ 只有 0.7° , 所以整个聚焦声束在管外壁覆盖区上的入射角如不相等, 则必须使聚焦声束在管外壁覆盖区上的入射角之差小于 $\alpha_{\text{最大}} - \alpha_{\text{最小}}$. 因此寻找聚焦声束在管外壁覆盖区存在最小入射角差的条件是应当引起重视的。

1. 最佳水声程公式

在公式推导过程中, 将以射线声学为依据, 忽略水介质的温度不均匀和杂质所引起的声场畸变和散射。

设聚焦探头在聚焦方向以声束轴线为对称轴均匀对称, 此时两个半聚焦角相等, 如图 2 所示。

引入下列符号: D 为探头晶片直径; F 为聚焦声束焦距; L 为聚焦声束轴线与管轴面的偏轴距; H 为聚焦声束轴线上探头到管外壁的水声程。从图 2 可得

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{D}{2F} \quad \text{或} \quad \theta = \sin^{-1} \frac{D}{\sqrt{4F^2 + D^2}}, \quad (2)$$

$$\varphi_1 = \alpha_1 + \theta, \quad \varphi_2 = \alpha_2 = \sin^{-1} \frac{L}{R}, \quad \varphi_3 = \alpha_3 - \theta. \quad (3)$$

再利用图中各量的关系可求得

$$\varphi_1 = \arcsin \frac{D}{R \sqrt{4F^2 + D^2}} \left(F + \frac{2FL}{D} - \sqrt{R^2 - L^2} - H \right) + \theta, \quad (4)$$

$$\varphi_3 = \arcsin \frac{D}{R \sqrt{4F^2 + D^2}} \left(\frac{2FL}{D} - F + \sqrt{R^2 - L^2} + H \right) - \theta. \quad (5)$$

假设要求声束入射角 $\alpha_1 = \alpha_3$, 利用 (3) (4) 和 (5) 式, 整理后可得

$$H = F - \sqrt{R^2 - L^2}, \quad (6)$$

此式的物理含义是: 当聚焦声束在水中的焦点落在与声束中心轴相垂直的管直径线上

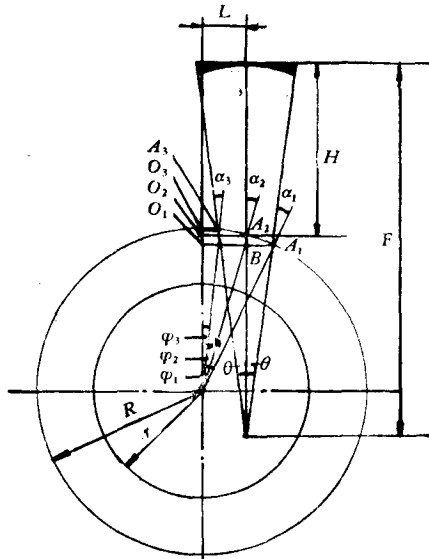


图 2 聚焦声束与管子参数的关系

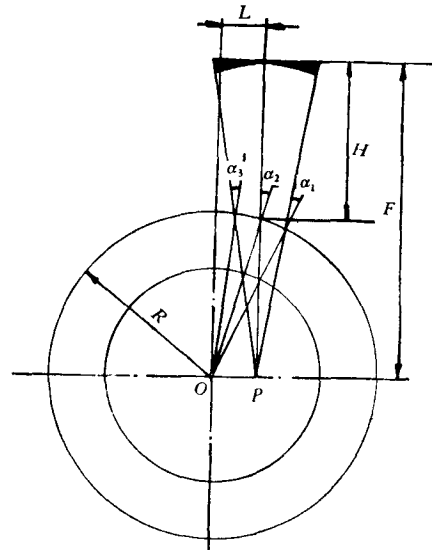


图 3 符合 $H = F - \sqrt{R^2 - L^2}$ 时的管子探头配置

时,将能使声束最外边的两条声线在管外壁上有相等的人射角,如图3所示。(6)式叫做聚焦探头在管子探伤时的最佳水声程公式。

在推导(6)式时,虽然要求 $\alpha_1 = \alpha_3$,但二者却不等于 $\alpha_2 = \sin^{-1} \frac{L}{R}$ 。这三个人射角的相互关系,不象文献[1]中图4.86所示那样,三个人射角都用 i 标出。

可以证明,符合 $H = F - \sqrt{R^2 - L^2}$ 的管子探头配置有下列性能:

(1) 聚焦声束中心轴两边的对称声线有相等的人射角。

(2) 入射角 α_1 和 α_3 是聚焦声束射至管外壁时所有人射角中最小的人射角。而 α_2 是最大入射角。

(3) 此时,两入射角 α_2 和 α_1 之差即 $\alpha_2 - \alpha_1$ 是所有探头,管子位置配置中最小的。

(4) 聚焦声束中心轴两边的声束在管外壁的入射角都由 α_1 (或 α_3)逐步变大到 α_2 。

因此,符合 $H = F - \sqrt{R^2 - L^2}$ 的管子探头配置是“最佳”配置。

不过,这时还有一个问题,那就是 α_2 与 α_1 之间的差是否有可能超出(1)式所要求的条件呢?

2. 对聚焦声束聚焦角的要求

考虑聚焦声束对管子探伤时的可变参数,可以看到聚焦声束半聚焦角 θ 是余下的一个独立变量,在探头其它参数固定的情况下,它的选择可以引起聚焦探头焦距的改变,是改变探头聚焦声束入射条件的一个因素。因此,现对聚焦角 2θ 进行讨论,看是否能通过对它的值的选择解决上节末尾所提出的问题。

根据(1)和(3)式应有

$$\varphi_2 - (\varphi_1 + \theta) < \sin^{-1} \frac{v_w}{v_s} \frac{r}{R} - \sin^{-1} \frac{v_w}{v_l}, \quad (7)$$

令

$$\sin^{-1} \frac{v_w}{v_s} \frac{r}{R} - \sin^{-1} \frac{v_w}{v_l} = \alpha \quad (8)$$

称为入射角窗口,意即入射角容许变动的范围。从(8)式可以看到:“ α ”只与管子本身的尺寸和管中的声学参数有关,因此“ α ”是管子的固有参数。只要管子材料和尺寸定后,该管子的入射角窗口“ α ”也就完全确定了。

根据(2),(3),(5)和(6)式,又由于 $\varphi_2 = \alpha_2$ 则对聚焦声束半聚焦角 θ 的要求为

$$\theta < \cos^{-1} \frac{\sin(\alpha_2 - \alpha)}{\sin \alpha_2}. \quad (9)$$

按照(8)式,假定选取(1)式下面所列 v_l 和 v_s 的值,有

$$\theta < \cos^{-1} 0.55 \frac{R}{R - t}, \quad (10)$$

式中 $t = R - r$ 。聚焦探头的聚焦角 2θ 应符合

$$2\theta < 2 \cos^{-1} 0.55 \frac{R}{R - t}. \quad (11)$$

(11)式表明,聚焦探头聚焦角如果太大,聚焦声束在管外壁的入射角会不满足(1)式。

分析(11)式,可以发现,在管材壁厚接近临界尺寸 $0.45R$ 的条件时,要求是严格的。

表1列出了不同 t/R 比管子的入射角窗口以及对聚焦角 2θ 的要求。可以看到,具有聚半聚焦角 θ 为 18.5° 的聚焦探头不能适用于 $\frac{t}{R} > 0.42$ 的管子。

表1 不同管壁壁厚和半径比的入射角窗口“ α ”和对聚焦角 2θ 的要求

$\frac{t}{R}$	入射角窗口 “ α ” = $\sin^{-1} \left(\frac{v_w}{v_s} \cdot \frac{r}{R} \right) - \sin^{-1} \frac{v_w}{v_l}$	允许半聚焦角 $\theta < \cos^{-1} 0.55 \frac{R}{R-t}$	聚焦角 $2\theta <$
0.10	$\sin^{-1} 0.405 - 14.5^\circ = 9.6^\circ$	52.3°	
0.20	$\sin^{-1} 0.360 - 14.5^\circ = 6.6^\circ$	46.6°	
0.30	$\sin^{-1} 0.3150 - 14.5^\circ = 3.9^\circ$	38.2°	
0.35	$\sin^{-1} 0.2925 - 14.5^\circ = 2.5^\circ$	32.2°	
0.40	$\sin^{-1} 0.2700 - 14.5^\circ = 1.3^\circ$	23.6°	47.2°
0.42	$\sin^{-1} 0.2610 - 14.5^\circ = 0.7^\circ$	18.5°	37°
0.43	0.4°	15.2°	30.4°
0.44	0.2°	11.9°	23.8°

三

对于 $\alpha_2 \approx \alpha_1$ (或 α_3), 且 $\alpha_2 > \alpha_1$ (或 α_3) 的验证是在一个可使聚焦声束对管子进行横向位移的架子上进行的。管子放于架子下面的V形槽上,转动管子和移动探头调整偏轴距,可以得到对缺陷波形的调整。

管子采用外径 $\phi = 40$ 毫米,壁厚 $t = 7$ 毫米的40 Cr 钢材, $\frac{t}{R} = 0.35$ 。

管子内表面人工标准缺陷刻完后实测尺寸为: 宽 0.121 毫米,深 0.187 毫米,沿管子轴向长为 4.80 毫米。

聚焦探头用 $\phi 12, 5$ 兆周的锆钛酸铅压电晶片作成,聚焦采用了在锆钛酸铅晶片前附加声透镜的方式。聚焦探头水中的计算焦点在 35 毫米处,由实测水中声场所得的焦距为 32 毫米,所以聚焦角符合表1要求。

用以上设备、采用水耦合。对人工标准缺陷反射波的强弱进行了试验,调整偏轴距 L 和水声程 H ,使之符合(1)和(6)式。对管子内表面人工缺陷检验时转动管子,在仪器萤光屏上得到如图4所示的缺陷波包络,呈现非对称现象。

利用 $\alpha_2 > \alpha_1$ 的结论,就可对此现象进行解释,如图4所示: 由于聚焦声束轴线上的人射角 α_2 与两侧的人射角 α_1 和 α_3 不相

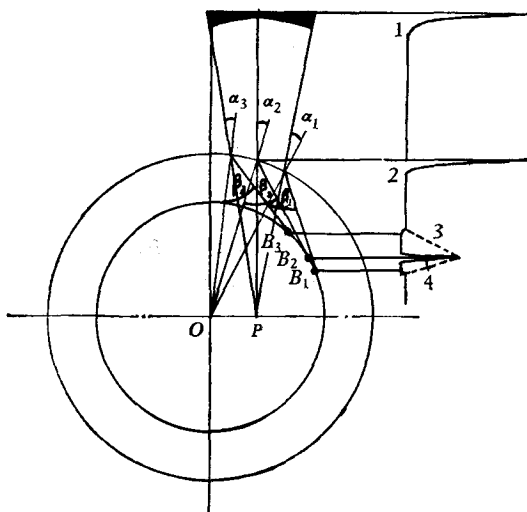


图4 缺陷波包络非对称现象及其与人射角之间的关系

等,而且有 $\alpha_2 > \alpha_1$ (或 α_3), 因此折射角 β_2 也比两侧的折射角 β_1 和 β_3 大, 由此在管内壁的声能就不按对称分布, 而是声能趋向于向内壁的 B_1 点集中. 由于声能呈现的此种分布, 结果使缺陷波在仪器萤光屏上的游动范围, 出现左大右小的非对称现象. 从而使缺陷波波幅高度在缺陷波游动时包络也呈现非对称现象. 因此, 这个缺陷波游动时包络呈现非对称现象正说明了 $\alpha_2 > \alpha_1$ 的成立.

四

(1) 用聚焦声束对管子进行探伤时, 符合 $H = F - \sqrt{R^2 - L^2}$ 的探头管子配置是“最佳”的配置.

(2) 当探头管子配置满足 $H = F - \sqrt{R^2 - L^2}$ 时, 聚焦声束在管子外壁覆盖区上的入射角不是都相等的, 其中中心轴线上入射角 α_2 最大, 两侧入射角 α_1 和 α_3 相等并为最小. 而且聚焦声束中心轴两边的对称声线有相等的入射角.

(3) 为使管中得到纯横波折射, 还必须使聚焦探头的聚焦角 2θ 满足

$$2\theta < 2\cos^{-1}0.55 \frac{R}{R-t}.$$

(4) 提出了一个表征管子固有入射条件的概念——入射角窗口.

参 考 文 献

- [1] 超音波探傷法, 日本學術振興會製綱第 19 委員會編, 1974 改訂新版.
- [2] Э. С. Веретенников, А. С. Матвеев, Дефектоскопия, 2 (1972), 114.
- [3] J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, Ultrasonic Testing of Materials (1969), New York.

A DISCUSSION ON THE INCIDENT ANGLES OF THE FOCUSING BEAM PROJECTING ON THE COVERED SREA ON THE OUTER SURFACE OF TUBE WALL UNDER NDT

SHEN JIAN-YA

(Mechanical and Electrical Institute, The First Ministry of Machine-Building)