

# 超声波参数对平底孔回波声压探测的影响

张晶,王黎,彭建平,罗林

(西南交通大学 光电工程研究所,四川 成都 610031)

**摘要:**针对超声波轴线声压对平底孔缺陷回波声压影响的问题,研究了基于当量法的超声探伤方法。首先,从点声源到声轴线上一点处的声压模型出发,通过菲涅尔近似理论,建立了声轴线的发射声场,得到了平底孔反射体的回波声压模型。对平底孔反射体的回波受平底孔尺寸、平底孔深度、声源尺寸、发射频率的影响进行了理论上的分析,并进行了实验模拟。结果表明,所建立的模型能对定量的无损评估有一定的指导意义。

**关键词:**声轴线声压;菲涅尔近似;当量法;平底孔;回波声压

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A

## Effect of Ultrasonic Parameters on Detection of the Echo Wave Sound Pressure of Flat-bottom Hole

ZHANG Jing, WANG Li, PENG Jianping, LUO Lin

(Photoelectric Technology Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Aimed at the problem of ultrasonic axis's sound pressure impacting on flat-bottom hole defect echo wave, this paper studies the approach of ultrasonic flaw based equivalent method. Firstly, according to the sound pressure model from the point sound source to a point on the sound axis, the transmitting sound field of wave axis has been set up and echo sound pressure model of the flat-bottom hole reflector has been established with Fresnel approximation theory. Then the effects of the dimension of flat-bottom hole, the depth of flat-bottom hole, the sound source size and the transmission frequency on the echo wave of the flat-bottom hole have been analyzed theoretically and simulated with experiment. The results showed that the model could be a guide to the quantitative nondestructive assessment.

**Key words:** sound pressure of ultrasonic axis; Fresnel approximation; equivalent method; flat-bottom hole; echo wave sound pressure

### 0 引言

在超声探伤中,为了确定工件中缺陷的大小,特别是点状缺陷的大小,常用的探伤反射法<sup>[1]</sup>因缺陷的形状和性质不同,使缺陷的真实大小和形状变得难确定。而当量法<sup>[1]</sup>是用相同条件下的自然缺陷回波和人工反射体回波比较,当这两种反射回波等高时,认定人工缺陷的尺寸是自然缺陷的当量尺寸。对于规则反射体,目前缺陷状况对缺陷回波高度影响的分析更偏重于实验分析和经验分析<sup>[2-4]</sup>。而本文的目的是以理论为依据,建立超声波声轴线对平底孔缺陷的回波声压模型,分析得到回波声压的影响因素。探伤人员在实践经验基础上,再加上理论的指导,使缺陷定量更准确。

一个完整的超声测量理论模型包括探头发射声场计算、发射声场与缺陷相互作用计算及缺陷回波声场计算<sup>[5]</sup>3个步骤。针对平底孔缺陷检测对象,

本文从点声源到声轴线一点处的声压出发,利用菲涅尔近似理论得出声轴线的发射声场,进而得出平底孔反射体的回波声压,并分别得出平底孔尺寸、平底孔深度、声源尺寸、发射频率对平底孔回波声压及回波分贝数的影响关系。

### 1 理论原理及模型

#### 1.1 声轴线发射声压模型

在超声检测中,当反射体条件不变时,其最大回波声压主要取决于声轴线上的声压分布。图1为声源轴线上声压示意图。由图可看出,圆盘声源中心为坐标原点,声源半径为 $a$ ,过中心的轴线为 $z$ 轴, $Q$ 点处的总声压为<sup>[6]</sup>

$$p = jk\rho_0 c_0 u_a e^{j\omega t} \int_0^a \frac{e^{-jk\rho}}{2\pi h} 2\pi\rho d\rho \quad (1)$$

式中: $k$ 为波数; $\rho_0$ 为介质的密度; $c_0$ 为声速; $u_a$ 为声源振动波面的振动速度; $\rho$ 为极径; $h$ 为观察点到声

收稿日期:2011-07-06

作者简介:张晶(1987-),女,青海格尔木人,硕士生,主要从事物理电子学、无损检测方面的研究。王黎(1959-),男,教授,铁道部有突出贡献专家、国务院特殊津贴专家,西南交通大学理学院院长。

源上任意一点的距离; $\omega$ 和 $t$ 分别为角频率和时间。

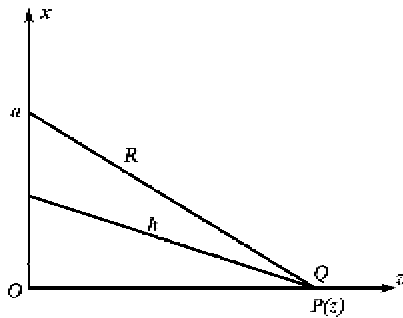


图1 声源轴线上声压示意图

对于固定的 $z$ 值, $2\pi\rho d\rho=2\pi h dh$ ,代入式(1)可得声压的振幅分布函数为

$$p=2p_0 \left| \sin \left[ \frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{a^2+z^2}-z) \right] \right| \quad (2)$$

式中 $p_0=\rho_0 c_0 u_n$ 为初始声压。观察式(2)可以得到,当 $\frac{\pi}{\lambda} \cdot (\sqrt{a^2+z^2}-z)=n\pi$ 时,声压具有最小值。

该位置声压振幅 $p=0$ 。当 $\frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{a^2+z^2}-z)=(2n+1)\frac{\pi}{2}$ 时,声压具有最大值 $p=2p_0$ ,此时 $z_n=$

$$\frac{4a^2-\lambda^2(2n+1)^2}{4\lambda(2n+1)}, n=0,1,2,\dots[(2a-\lambda)/2\lambda]$$

有 $(n+1)$ 个值。 $n=0$ 为距声源最远有一个最大值,得 $N=$

$$\frac{4a^2-\lambda^2}{4\lambda} \approx \frac{a^2}{\lambda} (2a \gg \lambda)$$

称为近场长度。在近场长度以内由于声源各点到轴线上某点的距离不同,相互叠加时存在相位差且相互干涉,使某些地方声压相互加强,而另一些地方声压相互减弱,于是出现声压极大、极小值的点。大于近场长度的区域即远场区域,当轴线长度远远大于声源尺寸时( $z \gg a$ ),由菲涅尔近似<sup>[7]</sup>可得总声压近似为

$$p \approx p_0 \frac{F_s}{\lambda z} \quad (3)$$

式中: $F_s=\pi a^2$ 为声源的面积; $\lambda$ 为波长。图2为声源轴线声压分布图。由图可知,出现最后一个极大值的位置 $N$ 具有特别重要的意义,它可看作声源辐射从近场过渡到远场的分界线。由于近场区存在极大、极小值,处于声压最大值处较小缺陷可能回波较高,而处于声压较小值处的较大缺陷可能回波较低,这样就可能引起误判,因此超声波探伤中重视避免近场区定量。当 $z > 3N$ 时,轴线上的声压与距离成反比,声场轴线上的声压均可按照球面波声压公式

$$p=p_0 \frac{F_s}{\lambda z}$$

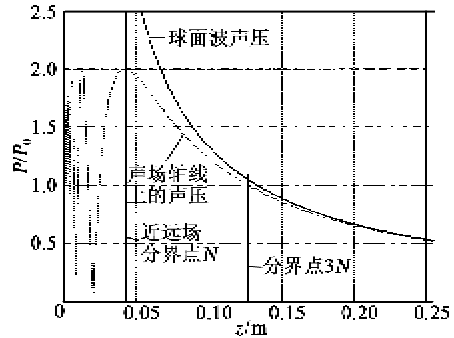


图2 声源轴线上声压分布

### 1.2 规则反射体的回波声压

在进行理论分析时常采用大平底、平底孔、长横孔、短横孔作为规则形状进行计算,此处主要讨论前两种类型。

半径为 $r$ 的平底孔,距离声源的轴向距离为 $z$ ,且 $z > 3N$ 。其半径 $r$ 满足 $r < (0.2\lambda z)/a$ 时,认为反射体足够小,声压在反射体上均匀分布。此时将平底孔视为新的声源,声源波在平面上发生全反射。

其起始声压由式(3)得 $p_z=p_0 \frac{F_s}{\lambda z}$ ,探头接收到的平底孔回波声压代入下式可得

$$p_l=p_z \frac{F_s}{\lambda z} = \frac{p_0 F_s F_l}{\lambda^2 z^2} = \frac{p_0 \pi^2 a^2 r^2}{\lambda^2 z^2} \quad (4)$$

式中 $F_s=\pi r^2$ 为平底孔缺陷的面积,对矩形的平底孔 $F_l$ 相应表示矩形缺陷的面积。由式(4)可知,当检测条件一定时( $F_s, \lambda$ ),平底孔缺陷回波的声压与平底孔的面积成正比,与距声源距离的平方成反比。其检测原理图如图3所示。任意两个回波声压的分贝数为

$$\Delta_{1,2}=20 \lg \frac{p_{l1}}{p_{l2}} \quad (5)$$

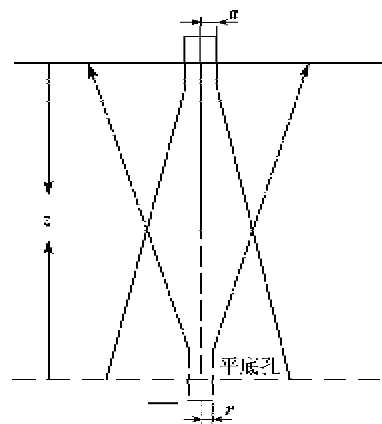


图3 平底孔回波

超声检测中,试块底面就是典型的大平底。若

大平底距离声源的轴向距离是  $z$ , 则超声束在大平底面上完全反射后向相反方向传播, 回到探头时的回波声压就相当于距离声源的距离为  $2z$  处得入射声压, 如图 4 所示, 当  $z > 3N$  时, 远场中大平底的回波声压为

$$p_B = p_0 \frac{F_s}{\lambda z} \cdot \frac{1}{2} = p_0 \frac{\pi a^2}{2\lambda z} \quad (6)$$

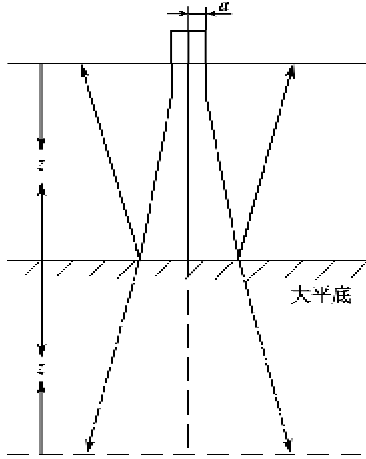


图 4 大平底的回波

由式(6)可知, 当检测条件一定时 ( $F_s, \lambda$ ), 大平底的回波声压与距离声源的距离成反比。其任意回波声压分贝数代入式(5)即可。检测条件一定时 ( $F_s, \lambda$ ), 平底孔缺陷相对于大平底回波声压的回波声压分贝由式(4)~(6)可得

$$\Delta_{1,2} = 20 \lg \frac{p_f}{p_B} = 20 \lg \frac{p_0 \pi^2 a^2 r^2}{\lambda^2 z_2^2} = 20 \lg \frac{2\pi z_1 r^2}{\lambda z_2^2} \quad (7)$$

式中:  $z_1, z_2$  分别为声源到大平底和声源到平底孔缺陷的距离;  $r$  为平底孔缺陷的尺寸(半径)。由式(7)可知, 缺陷的回波分贝数与缺陷的尺寸、缺陷及大平底到声源的距离有关。

而对于相同尺寸和深度 ( $F_f, z$ ) 的平底孔缺陷, 其不同检测条件下所得平底孔回波分贝数为

$$\Delta_{1,2} = 20 \lg \frac{p_n}{p_E} = 20 \lg \frac{p_0 \pi^2 a_1^2 r^2}{\lambda_1^2 z^2} = 20 \lg \frac{F_{a1} \lambda_2^2}{F_{a2} \lambda_1^2} \quad (8)$$

式中  $F_{a1}, F_{a2}$  分别为不同声源的面积, 对应不同的声源尺寸,  $\lambda_1, \lambda_2$  为入射波波长。对于相同材料, 因为发射频率和波长成反比, 所以可知相同平底孔缺陷的回波分贝数与声源尺寸、发射频率有关。

## 2 实验结果

### 2.1 平底孔尺寸对回波声压的影响

发射声源采用单晶圆盘声源, 半径  $a = 10 \text{ mm}$ , 发射频率  $f = 2.5 \text{ MHz}$ 。对于深度  $L = 200 \text{ mm}$  的刚性试块, 平底孔位于轴向距声源  $z = 170 \text{ mm}$  处, 对应的缺陷尺寸  $r$  应满足  $r < (0.2\lambda z)/a = 8 \text{ mm}$ 。取深度  $z' = L - z = 30 \text{ mm}$  处缺陷半径分别为  $0.5 \text{ mm}, 0.8 \text{ mm}, 1.0 \text{ mm}, 1.5 \text{ mm}, 3.0 \text{ mm}, 5.0 \text{ mm}$  平底孔作为检测对象, 其回波分贝数由式(8)计算得出, 对应回波声压分布图如图 5 所示, 表 1 为平底孔深度  $30 \text{ mm}$  处, 不同尺寸平底孔所得回波分贝数对照表。

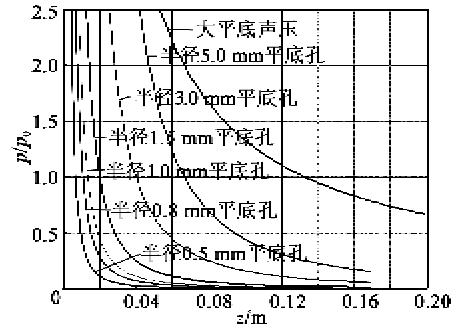


图 5 不同尺寸平底孔缺陷回波声压分布图

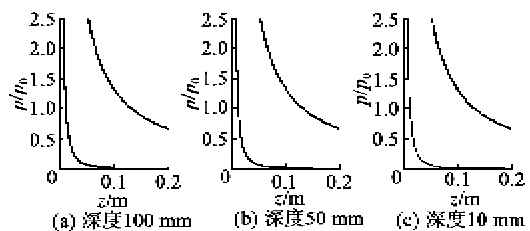
表 1 不同尺寸平底孔回波分贝数

缺陷尺寸/mm	0.5	0.8	1.0
$\Delta_{1,2} = 20 \lg \frac{2\pi z r^2}{\lambda z_1^2}$	-46.7	-38.6	-34.7
缺陷尺寸/mm	1.5	3.0	5.0
$\Delta_{1,2} = 20 \lg \frac{2\pi z r^2}{\lambda z_1^2}$	-27.6	-15.6	-6.7

由图 5 和表 1 可得, 在相同声源检测条件下, 对于同深度不同尺寸的平底孔缺陷, 回波声压随缺陷尺寸的增大而增大, 其回波声压分贝也随之增大。

### 2.2 平底孔深度对回波声压的影响

在相同检测环境下, 检测试块仅考虑缺陷尺寸  $r = 1 \text{ mm}$ , 与底面的距离  $z'$  分别为  $100 \text{ mm}, 50 \text{ mm}, 10 \text{ mm}, 5 \text{ mm}, 1 \text{ mm}, 0.5 \text{ mm}$  深度的平底孔缺陷作为检测对象, 对应不同深度平底孔缺陷回波声压分布如图 6 所示, 其不同深度平底孔所得回波分贝数对照表如表 2 所示。



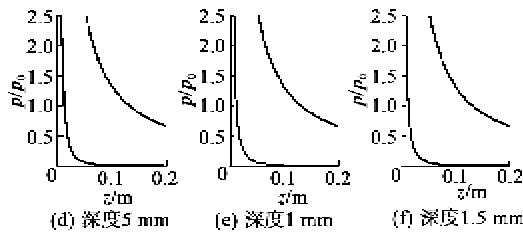


图6 不同深度平底孔缺陷回波声压分布图

表2 不同深度平底孔回波分贝数

深度 $z'/\text{mm}$	100.0	50.0	10.0
$\Delta_{1,2} = 20 \lg \frac{2\pi z r^2}{\lambda z_1^2}$	-25.5	-32.5	-36.6
深度 $z'/\text{mm}$	5.0	1.0	0.5
$\Delta_{1,2} = 20 \lg \frac{2\pi z r^2}{\lambda z_1^2}$	-37.1	-37.4	-37.5

由图6和表2可知,在相同声源检测条件下,对于相同尺寸、不同深度的平底孔缺陷,回波声压随声源与平底孔间距  $z$  增大而减小,其回波声压分贝也随之减小,且在声源与平底孔距离趋于试块深度时,回波声压近似相等。

### 2.3 发射频率对平底孔回波声压的影响

用半径  $a = 10 \text{ mm}$ 、不同发射频率的发射声源对刚性试块中的同一平底孔进行检测。试块深度  $L = 200 \text{ mm}$ ,平底孔缺陷半径  $r = 3 \text{ mm}$ ,深度(平底孔到大平底之间的距离)为  $z'_1 = 0.5 \text{ mm}$ 。在此讨论发射频率分别为  $0.5 \text{ MHz}$ 、 $1.0 \text{ MHz}$ 、 $2.5 \text{ MHz}$ 、 $5.0 \text{ MHz}$ 、 $8.0 \text{ MHz}$  对应的回波声压分布。图7为频率对回波声压的影响,相应的回波声压分贝数对照表如表3所示。

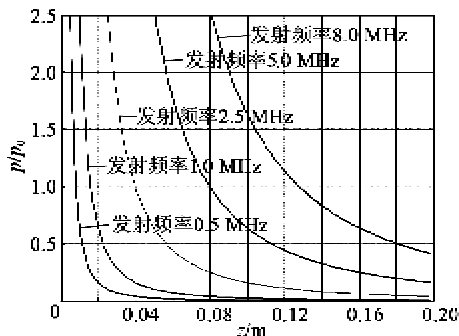


图7 发射频率不同下的回波声压分布

表3 不同发射频率对相同平底孔的回波声压分贝表

发射频率/MHz	0.5	1.0	2.5	5.0	8.0
$\Delta_{1,2} = 40 \lg \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$	-	-12.04	-27.96	-40.00	-48.16

由图7和表3可得,用同样的声源尺寸检测相

同的平底孔缺陷,回波声压随发射频率的增加而增加,其回波声压分贝数反而减小。

### 2.4 声源尺寸对平底孔回波声压的影响

用相同发射频率  $f = 2.5 \text{ MHz}$ 、不同尺寸声源对刚性试块中的同一平底孔进行检测。试块深度  $L = 200 \text{ mm}$ ,平底孔缺陷半径  $r = 3 \text{ mm}$ ,深度为  $z'_1 = 0.5 \text{ mm}$ 。在此讨论声源半径分别为  $3.5 \text{ mm}$ 、 $5 \text{ mm}$ 、 $7 \text{ mm}$ 、 $10 \text{ mm}$ 、 $20 \text{ mm}$  对应的回波声压分布。图8为声源尺寸对回波声压的影响,相应的回波声压分贝数对照表如表4所示。

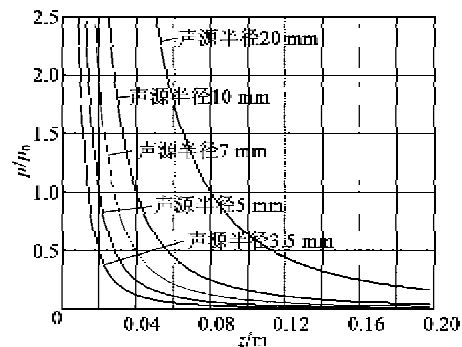


图8 声源尺寸不同下的回波声压分布

表4 不同声源尺寸对相同平底孔的回波声压分贝表

声源半径/mm	3.5	5.0	7.0	10.0	20.0
$\Delta_{1,2} = 40 \lg \frac{a_1}{a_2}$	-	-6.20	-12.04	-18.24	-30.28

由图8和表4可得,用同样的发射频率检测相同的平底孔缺陷,回波声压随声源尺寸的增加而增加,其回波声压分贝数反而减小。

### 3 结束语

本文基于菲涅尔近似建立了一个完整的单晶声源声轴线上平底孔缺陷的回波声压的测量模型,并分别得出平底孔尺寸、平底孔深度、声源尺寸、发射频率对平底孔回波声压及回波分贝数的影响关系。结果表明:对于同深度不同尺寸的平底孔缺陷,回波声压随缺陷尺寸的增大而增大,其回波声压分贝也随之增大;对于同尺寸不同深度的平底孔缺陷,回波声压随声源与平底孔间距离增大而减小,其回波声压分贝也随之减小;用同样的声源尺寸检测相同的平底孔缺陷,回波声压随发射频率的增加而增加,其回波声压分贝数反而减小;用同样的发射频率检测相同的平底孔缺陷,回波声压随声源尺寸的增加而增加,其回波声压分贝数反而减小。

(下转第522页)