

# 表面波检测中缺陷的当量深度确定

张复懿,林洪玉,张晶,刘丽

(中国第一重型机械股份公司,齐齐哈尔 161042)

**摘要:**针对采用表面波检测工件表面、近表面缺陷( $d < 2\lambda$ )时无法测定缺陷深度这一问题,通过理论计算不同距离处具有一定长度、不同深度的人工模拟裂纹缺陷反射回波与工件棱边(可视为无限长、无限深裂纹)反射回波之间的波幅差 $\Delta$ 值,并与实际检测得出的数据进行线性拟合。试验结果表明,理论计算值与实际检测值吻合情况良好,因此可以通过理论计算作出相应的DGS曲线来对表面及近表面缺陷进行相应的当量深度估算,弥补了该领域的空白。

**关键词:**超声表面波;检测灵敏度;当量深度;距离-波幅曲线

中图分类号:TG115.28 文献标志码:A 文章编号:1000-6656(2012)08-0039-04

## Analysis of Equivalent Depth About Flaw in Ultrasonic Surface Wave

ZHANG Fu-Yi, LIN Hong-Yu, ZHANG Jing, LIU Li

(China First Heavy Industries, Qiqihaer 161042, China)

**Abstract:** To solve the problem that the depth of surface and near-surface defects( $d < 2\lambda$ ) can not be measured. Through the theoretical calculation, the value of the difference amplitude between the crack defects of artificial simulation at different distances with a certain length and the edge of workpiece was obtained, and the later one could be considered as infinitely length and infinitely depth. Comparisons were made with the actual testing data after linear fitting it. The result showed that the theoretical value was nearly the same with that obtained from the experiment. So it could make the corresponding equivalent depth analysis with DGS curves which were drawn by theoretical calculation for the surface and near surface defects. It filled a blank of this field.

**Keywords:** Ultrasonic surface wave; Flaw detection sensitivity; Equivalent depth; DGS curve

实践表明,表面波对于表面、近表面的缺陷具有一定的检出率,是一种可用的检测手段。但其对于检测出来的缺陷无法进行相应的当量深度估算,是它的一个主要缺点。

文章采用理论计算与实际检测相结合的方式,提出一种可以用来对表面波检测出的缺陷进行当量深度估算的方法,得出了一些有用的数据结果。

## 1 表面波检测原理

表面波是超声波在介质中传播的一种形式,它只在固体表面很浅的表层内传播。由平行于波传播方向的纵波和垂直于波传播方向的横波所合成。其

收稿日期:2012-04-11

作者简介:张复懿(1980—),男,助理工程师,硕士研究生,从事金属材料无损检测工作。

质点的运动轨迹是限于  $XOZ$  平面内的椭圆,具有纵波和横波的综合特性,如图 1 所示<sup>[1]</sup>。

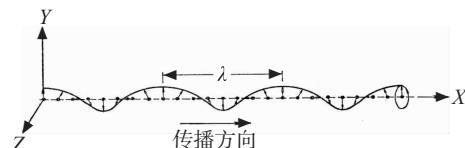


图 1 表面波质点振动与波的合成示意图

表面波的声速按下式计算:

$$c_r = \frac{0.87 + 1.12v}{1+v} c_t \quad (1)$$

式中  $v$ —泊松比,对于钢  $v=0.29$ ;

$c_t$ —横波声速,对于钢  $c_t=3230 \text{ m/s}$ 。

由式(1)得出钢中表面波声速  $c_r=2990 \text{ m/s}$ 。

表面波能量的分布随泊松比而略有差异,表面

下2倍波长深度范围内包括大部分能量,表面下2倍波长深度处的位移为表面的1/100(−40 dB),所以在这个深度上的缺陷比在表面上的缺陷的反射脉冲小约1/100。可以认为,表面下2倍波长深度范围是表面波可检测的深度范围。即当采用超声波频率 $f=2\text{ MHz}$ 时,超声波长 $\lambda=c_r/f=1.495\text{ mm}$ ,则表面波探测的深度范围为 $2\lambda \approx 3\text{ mm}$ 。

当其在沿工件表面传播的过程中遇到裂纹时,表面波R的传播将会发生变化(图2),一部分超声波在裂纹开口处以表面波的形式反射,并沿物体表面返回;另一部分超声波仍以表面波形式沿裂纹表面继续向前传播,传播到裂纹顶端时,部分声波被反射返回,部分声波继续以表面波形式沿裂纹表面向前传播;还有一部分声波在表面转折处或裂纹顶端转变为变型纵波L和横波T,在物体内部传播。在实际表面波检测中,主要利用表面波的上述特性来探测工件表面和近表面裂纹。

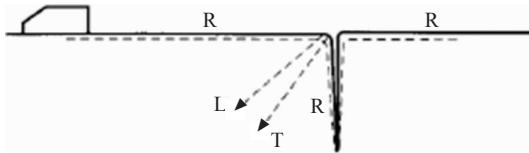


图2 表面波传播到表面裂纹处的情况示意图

## 2 试验方案

试验采用USN60数字超声波仪器(美国GE-KK产品)。为提高对近表面缺陷的检测灵敏度,试验选用频率为5 MHz,入射角约为63°,晶片尺寸为8 mm×8 mm的表面波探头,分别对深0.1,0.2,0.3,0.4,0.5 mm,长6.5 mm线槽的试块进行测定,具体实测数据见表1。

## 3 试验结果分析及讨论

从表1中可以看出,随着模拟裂纹深度的增加,反射波幅随之逐渐增大,而相同深度的人工模拟裂纹,其反射波幅则随着距离的增大而逐渐减小。从表1中可以观察到,当人工缺陷的深度与探头前沿距离一定时,人工模拟缺陷与棱边的反射回波差值为一定值。利用以上特性,在实际检测中可以利用工件或试块的棱边与不同深度人工缺陷之间的反射回波在不同距离之间的差值来调整检测灵敏度,从而对检测中发现的裂纹进行当量深度估算。

根据相关论文<sup>[2-4]</sup>介绍,可以把工件或试块棱边看作无限长和无限深的裂纹。对于各种钢材,棱

表1 实测不同距离、不同深度的模拟裂纹波幅值 dB

距探头前沿 距离 $L/\text{mm}$	线槽深度 $z/\text{mm}$					
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	试块棱边
10	29.8	34.7	37.9	37.8	42.1	44.0
20	25.4	28.8	31.4	34.6	38.5	44.2
30	23.6	28.6	30.0	33.2	36.3	42.0
40	20.8	26.4	28.8	32.4	32.4	41.7
50	17.5	20.5	26.4	25.6	30.3	38.2
60	13.2	19.4	22.3	25.0	27.1	36.4
70	14.0	19.3	20.1	22.9	26.4	37.9
80	11.0	18.2	19.6	23.6	23.7	35.1
90	13.1	17.3	19.5	22.0	22.3	36.4
100	9.2	15.1	18.7	20.6	20.1	33.6
110	6.3	13.2	14.5	16.7	19.5	32.3

边反射回波与有限长度、有限深度的人工模拟裂纹的波高比可以用下式计算:

$$\frac{H_B}{H_f} = \sqrt{\frac{\pi x}{2Ln}} \cdot \frac{\int_0^2 (e^{-a\frac{z}{\lambda}} - b \times e^{-c\frac{z}{\lambda}}) d\left(\frac{z}{\lambda}\right)}{\int_0^n (e^{-a\frac{z}{\lambda}} - b \times e^{-c\frac{z}{\lambda}}) d\left(\frac{z}{\lambda}\right)} \quad (2)$$

式中  $H_B$ —工件端部反射回波高值;  
 $H_f$ —人工模拟裂纹反射回波高值;  
 $L$ —人工模拟裂纹的长度;  
 $n$ —人工模拟裂纹深度与表面波波长之比值;  
 $x$ —人工模拟裂纹至探头前沿距离;  
 $\lambda$ —表面波波长;  
 $z$ —人工模拟裂纹的深度;  
 $a, b, c$ —与钢材弹性性质有关,取决于泊松比 $\sigma$ 的常数。

由文献[5]知,钢的 $a=5.429, b=1.750, c=2.376$ 。现假定人工模拟裂纹长度为 $L=6.5\text{ mm}$ ,深度分别为 $z=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5\text{ mm}$ ,则可根据式(2)计算出5 MHz的表面波探头在不同距离处时的工件或试块棱边反射回波与人工模拟裂纹反射回波之间的波高比值 $H_B/H_f$ ,具体计算过程如下:

对于5 MHz表面波探头,其波长 $\lambda=0.598\text{ mm}$ ,现假定人工模拟裂纹长度 $L=6.5\text{ mm}$ ,深度 $z=0.1\text{ mm}$ ,则 $n=z/\lambda=0.17$ 。通过对式(2)进行简化运算,可以得到5 MHz表面波探头在不同距离处时的工件棱边反射回波与深度为 $z=0.1\text{ mm}$

的人工模拟裂纹反射回波之间的波高比值  $H_B/H_f$  的简化式:

$$\frac{H_B}{H_f} = 1.830\sqrt{x} \quad (3)$$

于是可以得出两者之间的波幅差为:

$$\Delta = 20\lg \frac{H_B}{H_f} = 20\lg 1.830\sqrt{x} = \\ 20\lg 1.830 + 10\lg x = 5.25 + 10\lg x \quad (4)$$

分别把距离  $x=10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110$  mm 代入式(4)中, 可以得出不同距离处的工件棱边反射回波与深度  $z=0.1$  mm 的人工模拟裂纹反射回波之间的波幅差  $\Delta$  值。

采用同样的分析方法, 可以由式(2)分别得出不同距离处的工件棱边反射回波与深度分别为  $z=0.2, 0.3, 0.4, 0.5$  mm 的人工模拟裂纹反射回波之间的波幅差  $\Delta$  值, 计算结果见表 2。

表 2 理论计算不同距离、不同深度的模拟裂纹与棱边反射回波之间的波幅差  $\Delta$  值 dB

距探头前 沿距离 $L/\text{mm}$	线槽深度 $z/\text{mm}$				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
10	15.2	9.5	6.3	4.3	2.9
20	18.3	12.5	9.4	7.3	5.9
30	20.0	14.2	11.1	9.1	7.7
40	21.3	15.5	12.4	10.3	8.9
50	22.2	16.4	13.3	11.3	9.9
60	23.0	17.2	14.1	12.1	10.7
70	23.7	17.9	14.8	12.8	11.3
80	24.3	18.5	15.4	13.4	11.9
90	24.8	19.0	15.9	13.9	12.4
100	25.2	19.5	16.3	14.3	12.9
110	25.7	19.9	16.8	14.7	13.3

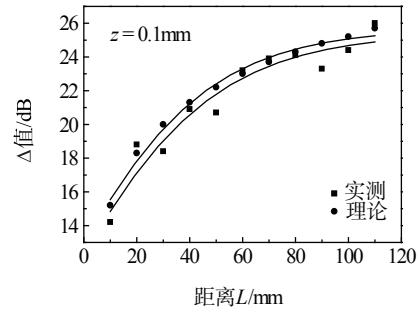
对表 1 中由试验测定的不同距离、不同深度的模拟裂纹与棱边反射回波的波高值(dB)数据进行整理, 得出工件棱边反射回波与深度分别为  $z=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$  mm 的人工模拟裂纹反射回波之间的实测波幅差  $\Delta$  值, 计算结果见表 3。

比较表 2 与表 3 中两组试验数据, 从局部对比来看, 在距探头前沿距离  $L$  和人工裂纹深度  $z$  相同的条件下时, 由理论计算得出的波幅差  $\Delta$  值与实测得出的波幅差  $\Delta$  值之间比较吻合; 从整体变化趋势来看, 随着距探头前沿距离  $L$  和人工裂纹深度  $z$  的增加, 两组数据之间的变化规律大体相同, 这说明式

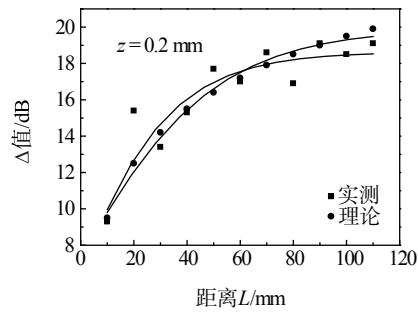
表 3 试验测定不同距离、不同深度的模拟裂纹与棱边反射回波之间的波幅差  $\Delta$  值 dB

距探头前 沿距离 $L/\text{mm}$	线槽深度 $z/\text{mm}$				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
10	14.2	9.3	6.1	6.2	1.9
20	18.8	15.4	12.8	9.6	5.7
30	18.4	13.4	12.0	8.8	5.7
40	20.9	15.3	12.9	9.3	9.3
50	20.7	17.7	11.8	12.6	7.9
60	23.2	17.0	14.1	11.4	9.3
70	23.9	18.6	17.8	15.0	11.5
80	24.1	16.9	15.5	11.5	11.4
90	23.3	19.1	16.9	14.4	14.1
100	24.4	18.5	14.9	13.0	13.5
110	26.0	19.1	17.8	15.6	12.8

(2)可以较好地描述出人工模拟裂纹与棱边反射回波之间波幅差  $\Delta$  值的变化规律。为简洁明了地表明这种变化趋势, 以表 2 与表 3 中深度  $z=0.1$  和  $0.2$  mm 的人工模拟裂纹与棱边反射回波之间的波幅差  $\Delta$  值为例, 对相应的两组数据进行线性拟合, 通过拟合曲线的变化趋势来描述这种变化规律, 结果如图 3 所示。



(a)  $z=0.1$  mm



(b)  $z=0.2$  mm

图 3  $\Delta$  值变化趋势

以上理论计算和实际检测结果表明,在实际表面波检测过程中,利用工件本身棱边或试块棱边的反射回波代替人工模拟裂纹缺陷反射回波来进行表面波检测灵敏度的调整,并对实际检测过程中发现的缺陷进行当量深度估算是否可行。

现以5MHz表面波探头为例,考虑到实际检测过程中可能面临的被检工件与试块材质上的差异,为避免灵敏度调整有很大出入,最好直接利用工件本身的直角棱边反射回波作为参考信号来调整灵敏度。

通过前文所进行的理论计算与实际测试对比试验,可以考虑通过实测工件不同距离处的棱边反射回波幅值并结合理论计算不同距离、不同深度的模拟裂纹回波幅值的方法来制作距离-波幅差曲线,从而达到在简化工作量的同时又能满足正常检测的要求。通过式(2)计算得出的不同距离、不同深度的模拟裂纹波幅值见表4。

表4 理论计算不同距离、不同深度的模拟裂纹波幅值dB

距探头 前沿距 离L/mm	线槽深度z/mm					试块棱边 (实测)
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
10	27.8	33.6	36.7	38.7	40.1	43.0
20	23.9	29.7	32.8	34.9	36.3	42.2
30	21.5	27.3	30.4	32.4	33.9	41.5
40	18.8	24.6	27.7	29.7	31.2	40.1
50	15.6	21.4	24.6	26.6	28.0	37.9
60	14.0	19.8	22.9	24.9	26.3	37.0
70	12.3	18.1	21.2	23.2	24.7	36.0
80	11.5	17.3	20.4	22.4	23.9	35.8
90	10.0	15.8	18.9	20.9	22.3	34.8
100	8.3	14.1	17.3	19.3	20.7	33.6
110	6.1	11.9	15.0	17.1	18.5	31.8

图4为根据表4数据作出的距离-波幅曲线。在实际检测过程中,通过表面波探头前后、左右移

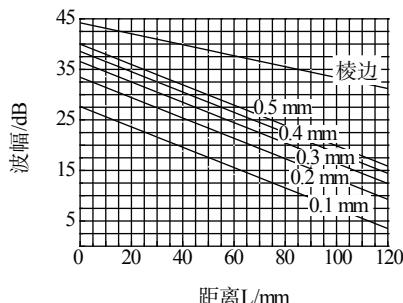


图4 距离-波幅曲线

动,能使探头到工件棱边或发现的缺陷水平距离保持在预定值。通过查图4距离-波幅差曲线,可以方便地得出不同深度人工缺陷与工件棱边之间的dB差,所以探伤灵敏度的调整和对缺陷的判别比较简便,具体步骤如下:

置表面波探头于被检工件上,使探头垂直对准被检测工件的一个棱边,探头前沿与棱边距离保持在40mm处(也可以选其它任意值,一般认为选取30~60mm为好),得到工件棱边的反射回波。假定以为规定的长为6.5mm,深为0.1mm的模拟裂纹作为起始检测灵敏度,从图4中可查出棱边的反射回波与长为6.5mm,深为0.1mm的模拟裂纹回波波高差值是21.3dB。调整仪器,设法使棱边回波达到一定高度(如满屏的80%)。之后,使仪器增益21.3dB,保持仪器状态不变,检测灵敏度则调整完毕。为进一步提高对缺陷的发现率,可在此基础上再提高4~6dB作为扫查灵敏度,即可对工件进行检测。

在检测过程中,如果出现缺陷回波信号,排除该回波为油污、锈蚀、划伤等引起后,并估计该回波信号可能达到判定值,那么,对探头做前后、左右移动,使缺陷回波移到荧光屏上的某一位置。通过查取图4曲线表,可以大致判断出该缺陷相当于长为6.5mm的裂纹的当量深度值。需指出的是,如实际裂纹的长度较6.5mm短,则其当量深度就比查得的裂纹当量深度要深,反之就比查得的值低。需要注意的是,这里的当量深度估算仅限于d<2λ深度范围的裂纹高度定量,因为表面波的传播仅限于2λ的深度。

#### 4 结论

文章通过理论计算与实际检测数据相结合的方法,对于深度d<2λ内表面波检测出的缺陷当量深度估算问题提出了一种新的解决思路,主要有以下优点:

(1) 理论计算波幅差与实际检测波幅差数据吻合较好,说明在实际表面波检测过程中,利用工件本身棱边或试块棱边的反射回波代替人工模拟裂纹缺陷反射回波来进行表面波检测灵敏度的调整并对实际检测过程中发现的缺陷进行当量深度估算是否可行。

(2) 得出了表面波检测用的距离-波幅差曲线(DGS),可以达到在简化工作量的同时又能对发现

## 中国机械工程学会无损检测分会第十届年会暨展览会 邀 请 信

由中国无损检测学会主办,南昌航空大学承办的中国机械工程学会无损检测分会第十届年会暨展览会定于2013年9月20—24日在江西省南昌市滨江宾馆召开。

此次大会暨展览会诚邀国内外、各地区的无损检测仪器设备制造商、无损检测相关专业的设备制造商、科研人员踊跃参加。本届展览会将为世界上最新无损检测设备、最新无损检测技术的交流搭建平台。届时一定会有众多从事无损检测事业的人员前来参加,一睹这一盛况。

**展览时间:**报到和布展:2013年9月20日

**展出日期:**2013年9月21日下午1:00~9月23日上午12:00(整2天)

**撤 展:**2013年9月23日下午1:00

**展出时间:**上午9:00~下午4:30

**展览地址:**江西省南昌市滨江宾馆(爱国路216号)。展览会共设上下两层场馆:面积共6000余平方米。

**参展费用:**未定。标准展台9平方米(3 m×3 m)

**组织方提供:**每一标准展台提供信息桌一张、椅缺陷进行当量深度估算的效果。

同时,还应该注意到,文章在缺陷的定量和定性方面研究得还不够深入,例如:采用这种方法对检测出的裂纹进行当量深度估算时仅适用于测量浅裂纹,并且其深度不超过所用探头的两倍波长,对更深的裂纹无法进行测定。即使是浅裂纹,往往也只能定出标准人工裂纹的当量高度,与实际裂纹高度尚有一定偏差,所以,如果在实际检测过程中,发现可疑信号或是对发现缺陷的当量深度估算和定性有疑惑时,应结合其它有效的检验手段对表面波检验结果进行验证,找出不足的地方并对其进行不断改进,使之更加符合实际检测的需要。

子两把、中英文企业眉板一条,220 V/500 W电源插座一个(供照明用),射灯或日光灯两支,摊位内满铺地毯。并为所有展商提供:在会刊上免费刊登企业简介,展览场地清洁、保安等服务。

**参展程序:**欲报名参展的单位,请按要求填写参展协议,加盖公章后寄至大会展览部秘书处(请复印存盘备查)。

**展台安排原则:**先付款,先安排。除非参展协议不获主办单位接纳,否则已交展费概不退还。主办单位收到参展协议书和展台费后即寄参展手册,以便参展单位做好各项准备工作。

**联系信息:**第十届中国机械工程学会无损检测分会年会展览部秘书处

地址:上海市辉河路100号3号楼6楼,邮编:200437

联系人:季敬元 王莹贊

电话:021-65550277

传真:021-65550277

电子邮箱:chsndt2008@163.com 或 chsndt@sh163.net.

(中国机械工程学会无损检测分会)

### 参考文献:

- [1] 郑晖,林树青.超声波检测[M].北京:中国劳动社会保障出版社,2008.
- [2] 林介东,梁浩,林清如.华能汕头燃机电厂2号压气机叶片超声波探伤报告[R].汕头:华能汕头燃机电厂,1994.
- [3] 梁浩,林清如,倪进飞,等.华能汕头燃机电厂1号透平、空压机动、静叶片超声波探伤报告[R].汕头:华能汕头燃机电厂,1994.
- [4] 林介东,倪进飞.燃气轮机叶片的超声波表面波探伤[J].中国电力,1997,30(7):42—45.
- [5] 李克明,刘德荣.超声波探伤[M].北京:水利电力出版社,1985.

**欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告**