

TOFD 检测中轴偏离缺陷方位参数的测量误差

伍卫平¹, 范钦红², 曹树林¹, 李东风¹, 韩志刚¹, 倪国胜¹

(1. 水利部水工金属结构质量检验检测中心, 郑州 450044;

2. 郑州辰维科技股份有限公司, 郑州 450001)

摘要:在 TOFD 非平行扫查检测中, 是假定缺陷位于焊缝中心轴线上的。因此对于偏离焊缝中心轴线的缺陷, 其埋藏深度和自身高度这两个方位参数的测量存在一定的误差。通过数学推导, 建立了相应的数学模型, 从理论上分析了埋藏深度、自身高度、偏心距大小、探头入射点间距等多个因素对该误差影响的变化规律, 并通过试块进行了试验验证。结果证明减小埋藏深度及高度测量误差的方法对 TOFD 无损检测工艺的选择具有较好的指导意义。

关键词:超声衍射时差法; 轴偏离缺陷; 数学模型; 探头入射点间距; 测量误差; 泰勒级数展开

中图分类号: TG115.28, TB552

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)09-0028-06

Measurement Error of Defect Orientation Parameters of TOFD Axis Deviation Detection

WU Wei-ping¹, FAN Qin-hong², CAO Shu-lin¹, LI Dong-feng¹, HAN Zhi-gang¹, NI Guo-sheng¹

(1. National Center of Quality Inspection & Testing for Hydro Steel Structure Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450044, China; 2. Zhengzhou Chenwei Science and Technology Co., Ltd, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: It is assumed that the defect is located in the center of the weld in parallel scan by TOFD, so the measurement of orientation parameters such as depth and height has some errors as for the axis deviation defects in weld. Through accurate mathematical deduction, the article establishes detailed mathematical model so as to analyze the changes regulation of measurement error of depth and height by various factors (such as true depth, true height, axis deviation, probe center separation), and experimental verification by TOFD block is carried out; meanwhile, the article proposes the methods of reducing the measurement error, and they have great guiding significance for process selection of TOFD nondestructive testing.

Keywords: Time of flight of diffraction; Axis deviation defects; Mathematical model; Probe center separation; Measurement error; Taylor series expansion

超声衍射时差法(Time of flight diffraction, TOFD)^[1-2]是依靠从缺陷的端角和端点处得到的衍射信号来检测焊缝中缺陷的方法。主要根据缺陷端部产生的衍射信号之间的时间差对缺陷进行定位和定量。由于其具有检测速度快、定量精度高、定位准确(精度可达 0.1 mm)和可以确定缺陷

尺寸等优点,同时除可显示射频 A 型波形图外,还可以得到 B 扫描图像,检测结果更直观,已经广泛应用于焊缝检测。

TOFD 技术对缺陷只能实现二维定位,即在平行于焊缝方向和焊缝深度方向可以定位,而在垂直于焊缝方向的位置,也即偏离焊缝中心的位置,需辅以平行扫查或者常规超声检测来确定。非平行扫查过程中对于偏离焊缝中心的缺陷(以下称为轴偏离缺陷),检测时是假定缺陷位于焊缝中心(也即缺陷位于探头对连线的中心轴线上),因此埋藏深

收稿日期: 2013-10-25

作者简介: 伍卫平(1984—),男,工程师,硕士,主要从事无损检测方面的实践及理论研究工作。

度和自身高度的这两个方位参数测量存在一定误差,即轴偏离误差。

1 轴偏离缺陷埋藏深度及高度的测量

TOFD法根据时差(声程)测量计算出的缺陷埋藏深度,是假定缺陷在探头对连线的中心轴线上,对于非平行扫查,是假定缺陷在焊缝中心。轴偏离缺陷偏离焊缝中心轴的距离叫做缺陷偏心距。对于非平行扫查,缺陷的埋藏深度及高度的测量存在如下几个问题^[3-5]:

(1) 对于埋藏深度不同的轴偏离缺陷,如果它们的声程相等,测量计算出的缺陷埋藏深度相等,而实际埋藏深度小于测量值。

若只考虑穿过探头对且与扫查面垂直的 x, y 平面,则对于某个端点的衍射信号,相等传输时间的轨迹曲线是一个椭圆。根据椭圆长、短半轴、焦距等信息,对应的数学模型可以用标准方程表示如下:

$$x^2/(h^2+s^2)+y^2/h^2=1 \quad (1)$$

式中: x 为缺陷端点的偏心距; y 为缺陷的真实深度; h 为缺陷的测量计算深度,也为缺陷端点所在椭圆的短半轴长 b 。椭圆的长半轴长为:

$$a = [\sqrt{(s-x)^2+y^2} + \sqrt{(s+x)^2+y^2}]/2 \\ = \sqrt{s^2+h^2} \quad (2)$$

其所在的轨迹图如图 1 所示。

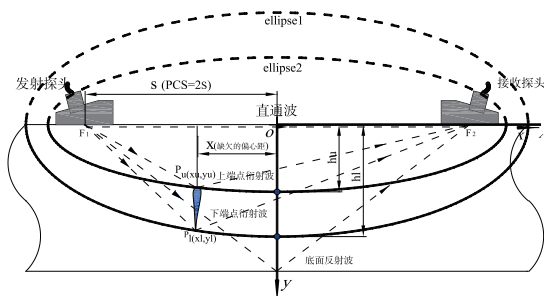


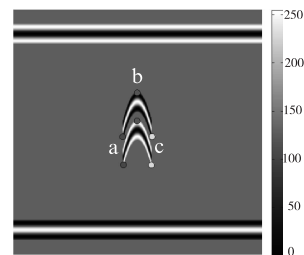
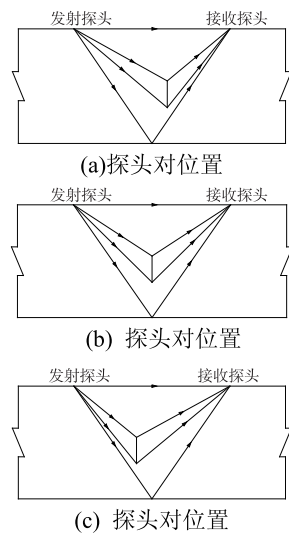
图 1 声程相等的缺陷所在椭圆曲线轨迹图

位于焊缝中心的缺陷(偏心距为 0),TOFD 检测设备测量计算出的埋藏深度最小,但它与实际值相等。平行扫查即是根据此道理来确定缺陷埋深,其原理见图 2。探头对从图 2(a)位置运动到图 2(b)位置再到图 2(c)位置,所检测到的缺陷分别对应着图 2(d)所示的 B 扫描灰度图中的 a、b、c,其中 b 才是所对应的缺陷真实的埋深、高度。

根据衍射信号传输的声程等于椭圆的长轴长,可以将方程(2)改写为方程(3):

$$ct = \sqrt{(s-x)^2+y^2} + \sqrt{(s+x)^2+y^2} \quad (3)$$

式中: t 为缺陷端点衍射信号的传输时间(已经减去探头对的延时); c 为声速; s 为探头对入射点间距的一半。



(d) 平行扫查的灰度图谱

图 2 平行扫查的原理图

在实际深度 y 一定的情况下,当 x 等于 0 时, t 最小,缺陷的测量计算深度 h 达到最小并等于实际深度 y ,即有 $h = y = \sqrt{(ct)^2/4 - s^2}$ 。因此平行扫查是通过探头对在垂直焊缝方向的移动,使缺陷刚好处于探头对连线的中心,以确定缺陷实际的最小深度及位置,即找出其最小深度(也即实际深度)和偏心距。

$$y = \sqrt{(ct)^2/4 - s^2} \cdot \sqrt{1 - 4x^2/(ct)^2} \quad (4)$$

对于测量计算埋深 h 相等的缺陷(轨迹在同一条椭圆曲线上),当 x 不超过 $0.2ct$ 时,所对应的最大、最小实际埋深分别为 $y_{\max} = h = \sqrt{(ct)^2/4 - s^2}$ 、 $y_{\min} = \sqrt{(ct)^2/4 - s^2} \cdot \sqrt{0.84} = 91.65\% \cdot h$;深度测量最大变化量为 $\delta\%_{\max} = (h - y_{\min})/h \times 100\% = 8.35\%$,可发现缺陷偏心距对深度测量的影响较小。

(2) 对于埋藏深度相等的轴偏离缺陷,TOFD 检测设备根据时差(声程)测量计算出的埋藏深度是不相同的,偏心距越大,计算出的埋深值越大,因此非平行扫查存在“深度测不准”的问题。对于有一定自身高度的轴偏离缺陷(假设上、下端点偏

距相等), TOFD 检测设备对缺陷的上、下端点的深度测量值均偏大, 因此高度测量误差略有抵消, 高度测量误差要小于对端点深度的测量误差。

2 轴偏离缺陷埋深及高度测量误差的讨论^[6,7]

笔者分析讨论的计算部分, 探头楔块角度为 60° 。为了讨论的简单化, 假设扫查面为平面而非曲面, 缺陷的上、下端点(有自身高度时)的偏心距相等, 且缺陷是埋藏型的。

2.1 探头入射点间距(L_{PCS} 值)及缺陷偏心距对缺陷埋深测量及高度测量的影响

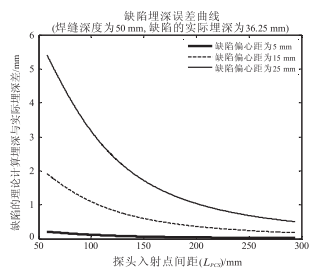
焊缝深度为 $D=50$ mm, 缺陷埋深 $y=12$ mm, 缺陷高度 $\Delta y=10$ mm, 缺陷的偏心距分别取 5, 15, 25 mm, 在探头入射点间距 L_{PCS} 值不断变化的情况下, 同时保证缺陷在两探头之间的区域内, 即使 s 满足条件: $s_{\min}=\max[x, D/3 \cdot \tan(\pi/3)]$; 在以下的计算中, $s_{\max}>5D/6 \cdot \tan(\pi/3)$ 。

缺陷的测量计算埋深 h 对应于椭圆的短半轴长:

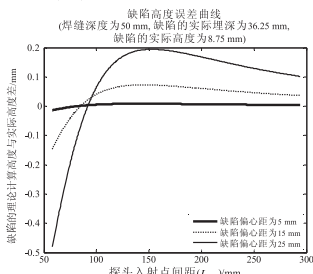
$$h = b = \sqrt{a^2 - s^2} \\ = \sqrt{[\sqrt{(s-x)^2 + y^2} + \sqrt{(s+x)^2 + y^2}]^2 / 4 - s^2} \quad (5)$$

缺陷的测量计算高度 h 为:

$$\Delta h = h_l - h_u \\ = \sqrt{[\sqrt{(s-x)^2 + y_l^2} + \sqrt{(s+x)^2 + y_l^2}]^2 / 4 - s^2} \\ - \sqrt{[\sqrt{(s-x)^2 + y_u^2} + \sqrt{(s+x)^2 + y_u^2}]^2 / 4 - s^2} \quad (6)$$



(a) 埋藏深度误差曲线



(b) 高度误差曲线

图3 L_{PCS} 值及偏心距对缺陷埋深及高度测量的影响

图3为 L_{PCS} 值及偏心距对缺陷埋深及高度测量的误差影响曲线, 由图4分析可以得出如下结论:

(1) 缺陷埋深、高度、偏心距 x 一定; L_{PCS} 值不太小时, 随着 L_{PCS} 值增大, 埋深误差及高度误差变小, 但埋深误差大于高度误差(考虑到 L_{PCS} 取值偏小的情况, 整个 L_{PCS} 值变化过程中, L_{PCS} 值对高度误差的影响不是单调的)。部分规范中建议考虑4倍试件厚度的 L_{PCS} 值。

(2) 缺陷埋深、高度、 L_{PCS} 值一定; 偏心距增大时, 埋深误差及高度误差均增大, 但埋深误差大于高度误差。

2.2 不同的缺陷高度及偏心距对缺陷高度测量的影响

缺陷埋深 $y=12$ mm, 缺陷的偏心距分别取 5, 15, 25 mm, 焊缝深度 $D=50$ mm, L_{PCS} 取值为主声束聚焦于 $2/3$ 深度处, 即 116 mm, 缺陷高度不断变化。

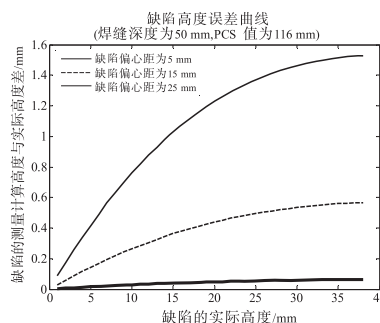


图4 缺陷高度及偏心距对埋深及高度测量的影响

图4为缺陷高度及偏心距对埋深及高度测量的误差影响曲线, 由图5可以得出如下结论:

(1) L_{PCS} 值、缺陷埋深、偏心距 x 一定; 缺陷实际高度增大时, 高度测量误差增大。

(2) L_{PCS} 值、缺陷埋深、高度一定; 缺陷偏心距 x 增大, 高度测量误差增大。

2.3 缺陷偏心距对缺陷埋深测量及高度测量的影响

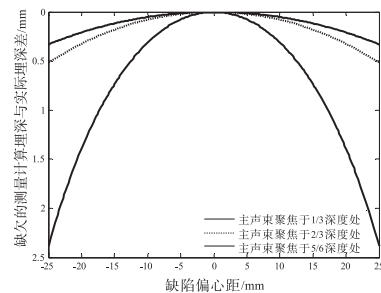
缺陷埋深 $y=12$ mm、缺陷高度 $\Delta y/100$ mm 一定, 偏心距 x 取值为主声束聚焦于 $1/3$ 、 $2/3$ 、 $5/6$ 深度处, 即 s 分别取值为: $D/3 \cdot \tan(\pi/3)$, $2D/3 \cdot \tan(\pi/3)$, $5D/6 \cdot \tan(\pi/3)$ 。

图5为缺陷偏心距对埋深及高度测量的误差影响曲线, 由图6可以得出如下结论:

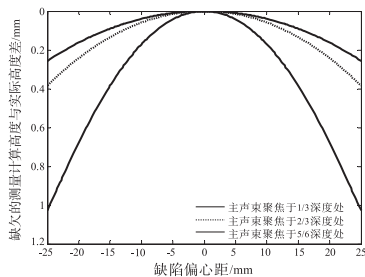
(1) 偏心距 x 增大时, 缺陷的埋深测量误差及高度测量误差均增大。

(2) 偏心距 x 的存在, 导致对缺陷上下端点的

深度测量值均偏大,从而使高度的测量误差小于埋深的测量误差。



(a) 埋藏深度误差曲线



(b) 高度误差曲线

图5 缺陷偏心距对埋深及高度测量的影响

2.4 缺陷埋深对缺陷埋深测量值 h 与实际埋深 y 间导数 $\frac{dh}{dy}$ 的影响

L_{pcs} 取值分别为主声束聚焦于 1/3、2/3、5/6 深度处,缺陷偏心距 x 取几种不同的值。

测量计算深度 h 是关于实际深度 y 的函数,由方程(1)可得式(7),其中 h 由式(5)替换。

$$\frac{dh}{dy} = \frac{yh(h^4 + 2h^2s^2 + s^4)}{x^2h^4 + y^2h^4 + 2y^2h^2s^2 + y^2s^4} \quad (7)$$

焊缝深度 $D=75\text{mm}$,缺陷埋深 $y=10\sim 70\text{mm}$,缺陷的偏心距 x 分别取 5 mm 和 25 mm。

图 7 是一阶导数对应的有关曲线,由一阶导数曲线可以推断,二阶及二阶以上导数是非常小的。

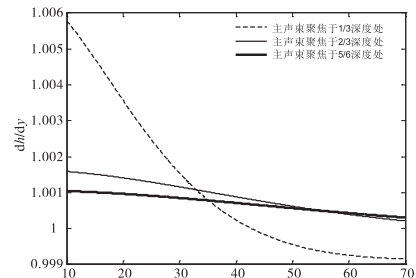
根据高等数学有关知识,将函数 $h(y)$ 按泰勒级数展开:

$$h(y_l) = h(y_u) + h'(y_u)(y_l - y_u) + \frac{h''(y_u)}{2!}(y_l - y_u)^2 + \dots + \frac{h^{(n)}(y_u)}{n!}(y_l - y_u)^n + \dots \quad (8)$$

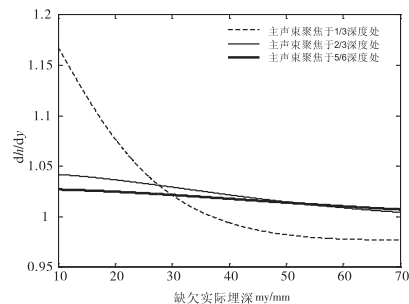
余项为 $R_n = \frac{h^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}(y_l - y_u)^{n+1}$ ($y_u \leq \xi \leq y_l$), 函数 $h(y)$ 可以展开为泰勒级数的充要条件是: $\lim_{n \rightarrow \infty} R_n = 0$ 。

式(8)中二阶及二阶以上导数非常小,可以忽

略,只取第一项;当 $h'(\xi) \approx 1$,即 $\frac{dh}{dy} \approx 1$ 时有: $h(y_l) - h(y_u) \approx y_l - y_u$,即 $\Delta h = \Delta y$ (9)



(a) 偏心距为 5 mm 时



(b) 偏心距为 25 mm 时

图6 缺陷埋深测量计算值与实际埋深间的导数关系

由图 6 中的曲线可以发现,主声束聚焦的深度越深,也即 L_{pcs} 值越大,一阶导数 $\frac{dh}{dy}$ 越趋于 1,即缺陷的测量高度越趋于其实际高度。

由以上的几点讨论可以发现, L_{pcs} 值越大,偏心距越小,椭圆曲线的离心率越大,椭圆越扁,轴偏离缺陷的埋深及高度测量误差越小。

但是同时要意识到: L_{pcs} 值过大,虽然可以增大波束覆盖范围,但信号衰减更厉害,直通波能量太小(没有直通波或信号微弱),也无法保证缺陷端点的衍射信号有足够的能量;上表面盲区增大;轴偏离底面盲区变小;上表面缺陷检测效果变差;信噪比降低,图像的分辨率降低,时间分辨率(也叫深度分辨力、纵向分辨力)降低;特征弧线的曲率变小,缺陷长度测量的精度也随之降低。因此应该综合考虑各种因素选择合适的 L_{pcs} 值。

3 试验分析^[8]

试验部分采用的 TOFD 设备为 ISONIC Star,楔块角度为,探头型号为 5 MHz $\phi 6$ 。采用厚度为 50 mm 的 TOFD 试块,如图 8 所示。试块的一个表面开了一条长 40 mm、深 2 mm、宽 0.2 mm 的表面矩形槽;在另一侧离开槽表面深度分别为 12.5、

37.5、46 mm处,有直径分别为 $\phi 3$ 、 $\phi 2.5$ 、 $\phi 2$ mm,长度分别为60、45、30 mm的平行于表面的三个侧孔,即三个孔的深度分别位于区间[11,14]、[36.25,38.75]、[45,47]。

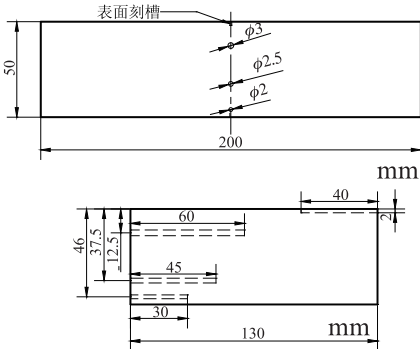
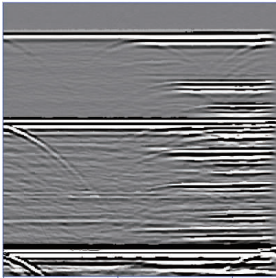
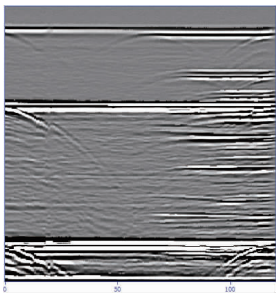


图7 TOFD试块尺寸

以开槽表面为扫查面,将第二个孔的上端点、第三个孔的上端点看作一个有自身高度的等效缺陷的上、下端点,即等效缺陷的埋深为36.25 mm、自身高度为8.75 mm。使 $L_{\text{pcs}}=116$ 、144 mm,在偏置非平行扫查中使等效缺陷的偏心距分别为5、15、25 mm。



(a) 非平行扫查($L_{\text{pcs}}=116$ mm)



(b) 非平行扫查($L_{\text{pcs}}=144$ mm)

图8 非平行扫查图谱

图7为非平行扫查的TOFD图谱,先根据 L_{pcs} 值和板厚50 mm(也即直通波和底面反射波)进行声速和延时校正,然后得到表1、表3所示的试验测量数据,表2、表4为埋深及高度误差的试验数据和理论计算数据,其中理论数据通过公式(5)和(6)来计算。

由图8可以发现, L_{pcs} 值越大,导致的图像深度分辨率越小,上表面盲区越大,靠近上、下表面的缺陷检出率降低,特征弧线的曲率更小,缺陷测长误差越大。

分析表1和表2的数据或者分析表3和表4中的数据,可以发现, L_{pcs} 值一定时,偏心距越大,缺陷(此处为等效缺陷)的测量埋深及测量高度误差越大,但高度误差要小于埋深误差。对照分析表2及表4中的数据,可以发现,缺陷偏心距一定, L_{pcs} 值越大,缺陷测量埋深误差越小;但是同样的偏心距、深度和高度的缺陷,高度测量误差并不是随 L_{pcs} 值单调变化的,只有当 L_{pcs} 值大于某一值后再继续增大,测量高度误差才越来越小;试验结果与前面的讨论结论一致。

表1 $L_{\text{pcs}}=116$ mm时的试验测量数据 mm

偏心距	等效缺陷埋深 试验测量值	等效缺陷高度 试验测量值
0	36.3	8.8
5	36.4	8.8
15	37.2	8.9
25	38.9	9

表2 $L_{\text{pcs}}=116$ mm时的试验测量误差与理论误差 mm

偏心距	等效缺陷埋深误差		等效缺陷高度误差	
	试验测量值	理论值	试验测量值	理论值
0	0.05	0	0.05	0
5	0.15	0.10	0.05	0.01
15	0.95	0.91	0.15	0.06
25	2.65	2.64	0.25	0.14

表3 $L_{\text{pcs}}=144$ mm时的试验测量数据 mm

偏心距	等效缺陷埋深 试验测量值	等效缺陷高度 试验测量值
0	36.2	8.8
5	36.3	8.8
15	36.8	8.9
25	8.2	9

表4 $L_{\text{pcs}}=144$ mm时的试验测量误差与理论误差 mm

偏心距	等效缺陷埋深误差		等效缺陷高度误差	
	试验测量值	理论值	试验测量值	理论值
0	-0.05	0	0.05	0
5	0.05	0.07	0.05	0.01
15	0.55	0.64	0.15	0.07
25	1.95	1.84	0.25	0.19

4 结论

通过建立详细的数学模型,从数学角度分析了在 TOFD 检测中,轴偏离缺陷埋藏深度、自身高度、偏心距大小、探头入射点间距对埋深和高度测量误差影响的变化规律。

对于同一个埋藏型的缺陷(即深度和高度一定),埋深测量误差是随着 L_{pcs} 值单调递减变化的;但是高度测量误差并不是随 L_{pcs} 值单调变化的,只有当 L_{pcs} 超过某一值后,高度测量误差才随 L_{pcs} 单调递减变化。自身高度测量误差要小于埋深测量误差,在大多数情况下,高度测量误差可以忽略不计。

在综合考虑和权衡大 L_{pcs} 值对衍射信号的能量、B 扫图像信噪比、表面盲区大小、缺陷深度分辨率、特征弧线曲率(关系到缺陷测长精度)等的负面影响的前提下,可以使 L_{pcs} 值稍微大些。

参考文献:

- [1] 2010 Asme BPVC V. 2010 Asme boiler and pressure vessel code, section v nondestructive examination, appendix III-time of flight diffraction (tofd) technique. [S].

- [2] J. P. CHARLESWORTH, J. A. G. Temple. Engineering applications of ultrasonic time of flight diffraction, second edition [M]. Research Studies Press LTD, 2001.
- [3] 迟大钊. 基于超声 TOFD 法的焊缝缺陷表征研究检测与定量研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2007.
- [4] CHEN T. L., QUE P. W., ZHANG Q., et al. Ultrasonic nondestructive testing accurate sizing and locating technique based on time-of-Flight-Diffraction method[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2005, 41(10):594-601.
- [5] 孙忠波, 郑红霞, 张平. TOFD 检测中借助变型波确定缺陷偏心距及缺陷精确深度的探讨[J]. 无损检测, 2010, 32(7):500-503+508.
- [6] MONDAL S., SATTAR T. An Overview of TOFD method and its mathematical model[J]. NDT(S0963-8695), 2000, 5(4):58-63.
- [7] 曹玉雯. 超声 TOFD 的缺陷检测与定量研究[D]. 北京化工大学, 2010.
- [8] 强天鹏. TOFD 技术的检测盲区计算和分析[J]. 无损检测, 2008, 30(10):738-741.

(上接第 27 页)

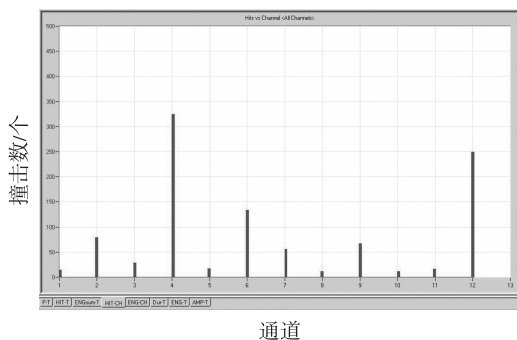


图9 大短信号计数-通道对应曲线

3 结语

复合材料由于其各向异性,信号极其丰富,多采用区域定位对声发射信号进行分析。试验结果显示,声发射信号能较准确反映试验件加载过程中的变化及损伤区域。但定位精度有待进一步提高。试验后对试验件损伤状态观察,进一步验证

了大长信号可表示试验件的宏观分层损伤,而大短信号可表示试验件的纤维断裂损伤,并可表示损伤区域发生的变化。但对复合材料受力各阶段各种损伤状态的区别,还有赖于大量材料或构件损伤状态模拟试验积累的大量数据来分析。目前,已有将现代信号处理方法如频域分析、小波分析、神经网络等分析方法应用于声发射检测的报道,更精细深入的信号分析及特征提取有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 郑洁,姚磊江,程起有,等. 复合材料损伤的声发射试验研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(11):1478-1481.
- [2] 刘怀喜,张恒,闫耀臣. 玻璃纤维/环氧树脂复合材料损伤与断裂过程的声发射特性[J]. 材料与表面处理, 2004(3):43-44.
- [3] 李海斌,阳建红,刘承武,等. 复合材料随机渐进失效分析与声发射监测[J]. 复合材料学报, 2011, 28(1):223-229.