

# 钢结构焊缝超声波探伤缺陷当量孔径的计算

杨晓东<sup>1</sup>,周鹏<sup>2</sup>,杨芳<sup>3</sup>,尚建丽<sup>1</sup>,王杨俊<sup>4</sup>

(1. 西安建筑科技大学 材料科学与工程学院,西安 710055;2. 陕建十一公司,西安 712100;  
3. 西安交通大学 外国语学院,西安 7100494;4. 陕西省纺织科学研究所,西安 710038)

**摘要:**通过理论分析和测试对比,确定钢结构熔透对接焊缝中横孔状焊接缺陷当量孔径适用的对比反射体为:RB,CSK-IC 系列试块上  $\phi$  3 mm 长横孔及 CSK-ⅢA 试块上的  $\phi$  1 mm 短横孔。试验测出 RB,CSK-IC 系列,CSK-ⅢA 试块与测试用试件表面能耗损失为 4 dB,将 RB,CSK-IC 系列试块不同深度  $\phi$  3 mm 长横孔和 CSK-ⅢA 试块上的  $\phi$  1 mm 短横孔反射回波幅值分别下调 4 dB 制作 DAC(距离-波幅)曲线。经超声波横孔理论回波声压分析,推导出钢结构熔透焊缝中类似于长横孔、短横孔状缺陷当量孔径的计算公式。对于竖孔状缺陷,制作不同孔径、不同厚度钢板的竖通孔反射体,建立波幅-孔径曲线及回归函数,中厚板用一、二次波探伤,薄板用三次波探伤,插入法计算当量孔径,并对这种缺陷当量计算方法进行了验证。

**关键词:**钢结构熔透焊缝;缺陷当量;超声波检测

中图分类号:TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2011)09-0068-04

## Caculation of Defects Equivalent Aperture in Ultrasonic Testing of Steel Structure Weld

YANG Xiao-Dong<sup>1</sup>, ZHOU Peng<sup>2</sup>, YANG Fang<sup>3</sup>, SHANG Jian-Li<sup>1</sup>, WANG Yang-Jun<sup>4</sup>

(1. Department of Material Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;  
2. Shaanxi the Eleventh Construction Engineering Company, Xi'an 712100, China; 3. School of Foreign Languages and  
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. Shaanxi Textile Science & Research Institute, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** The paper, through theoretical analysis and test comparison that the applicable contrastive reflectors in calculating the cross bore weld defect equivalent aperture in steel structure weld penetration were the followings, such as RB,  $\phi$  3 mm long cross bore in CSK- I C series test block and  $\phi$  1 mm short cross bore in CSK-Ⅲ A test block. It was revealed in our experiment that the surface energy consumption of RB, CSK- I C series test block, CSK-Ⅲ A test block and the check bar for test was 4 dB and the DAC curve was made when the dB values of RB,  $\phi$  3 mm long cross bore in the CSK- I C series test block with various depth as well as the reversed echo of  $\phi$  1 mm short cross bore in CSK-Ⅲ A test block were reduced by 4 dB respectively. By echo sound pressure analysis of Ultrasonic Cross Bore Theory, the formula for calculating the defect equivalent aperture of long and short cross bore in steel structure weld penetration was derived. As to the erect bore defect, the dB- $\phi$  curve and regression function were made for making erect through-hole reflector with steel plate of various aperture and thickness. The fault detection was made with primary and secondary wave for medium plate and with tertiary wave for thin plate. The method of Sorting by Insertion, the defect equivalent calculating method, was applied in calculating the equivalent aperture and was tested.

**Keywords:** Steel structure weld penetration; Defect equivalent; Ultrasonic testing

收稿日期:2010-12-17

基金项目:陕西省教育厅自然科学专项基金资助项目(09JK558)

作者简介:杨晓东(1968—),男,高级工程师,硕士,研究方向为结构检测和土木工程实验教学。

对于建筑钢结构熔透焊缝中比较大且几何尺寸较规则的缺陷,用超声波比较容易直接测量其尺寸。对于气孔、夹渣、熔穿和咬边等有一定厚度的未熔合和未焊透等缺陷,其几何尺寸直接用超声波测量比

较困难,可用超声波探收回波声压的物理参数计算其当量孔径。

## 1 缺陷回波特征分析

设备选用A型金属超声波探伤仪和5P6×6K2横波斜探头;选用钢材为Q345和Q235。

计算钢结构焊接缺陷当量尺寸时,需要将缺陷回波信号与人工标准反射体相比较。当熔透焊缝中缺陷回波波幅与某人工标准反射体回波波幅相同,则认为人工标准反射体的尺寸为焊缝缺陷当量尺寸。超声波探伤时,只要可以确保三倍以外场区探伤,则通用标准反射体,如平底孔、长横孔、短横孔、球孔和大平底等规则反射体理论回波声压公式都适用。

钢结构熔透焊缝中部常见缺陷(非直接测几何尺寸)大多数与长横孔和短横孔比较相似。所以选择长横孔和短横孔回波声压理论推导横孔状缺陷当量孔径的计算公式。焊缝中类似竖孔状(近焊缝根部类似点状)缺陷当量孔径需另行制作反射体推导计算方法。

## 2 横孔状缺陷当量计算

### 2.1 长横孔对比反射体

国内外不同行业的标准反射体对比试块有多种。GB 11345—1989《钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果分级》标准中规定的对比试块为RB系列;JG/T 203—2007《钢结构超声波探伤及质量分级法》标准中规定的对比试块为CSK-I C系列(网架探伤专用)。RB系列试块上的反射体为不同深度 $\phi 3\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 孔;CSK-I C系列试块上的反射体为不同深度 $\phi 3\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 孔。

通过理论分析可知,RB、CSK-I C系列试块互为等效试块<sup>[1]</sup>,且 $\phi 3\text{ mm}$ 孔径深度相互补充。这两种系列的试块可以联合用于制作钢结构熔透对接焊缝探伤的距离-波幅曲线(DAC曲线)。

### 2.2 短横孔对比反射体

短横孔对比反射体选用压力容器行业常用的CSK-III A试块上的不同深度 $\phi 1\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 孔。

### 2.3 DAC曲线

(1) 表面耦合损耗补偿确定 经测试,研究用钢板比标准试块的回波能量低3~4 dB,所以DAC曲线制作时表面补偿4 dB。

(2) 长横孔DAC曲线制作 用5P6×6K2探头在RB、CSK-I C试块不同深度 $\phi 3\text{ mm}$ 孔进行幅

表1 CSK-I C和RB试块不同深度 $\phi 3\text{ mm}$

深度/mm	长横孔回波幅值			dB
	CSK-I C(R60)	RB	平均	
5	62	60	61	57
10	50	52	51	47
15	47	49	48	44
20	42	45	44	40
25	37	—	37	33
30	—	39	39	35
40	—	33	33	29
50	—	27	27	24
60	—	23	23	19
70	—	20	20	16
90	—	12	12	8

值实测,取其平均值,结果如表1。DAC曲线及回归函数如图1。

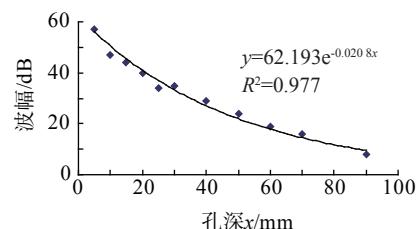


图1  $\phi 3\text{ mm}$ 长横孔缺陷定量计算DAC曲线

(3) 短横孔DAC曲线制作 用5P6×6K2探头在CSK-III A试块对 $\phi 1\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 孔径进行幅值实测,结果见表2。DAC曲线及回归函数如图2。

表2 CSK-III A试块上 $\phi 1\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 短横孔回波幅值

深度/mm	CSK-III A	-4 dB	深度/mm	CSK-III A	-4 dB	dB
10	46	42	60	18	14	
20	39	35	70	16	12	
30	33	29	80	12	8	
40	30	26	90	10	6	
50	24	20				

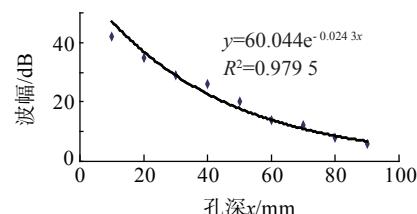


图2  $\phi 1\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 短横孔缺陷定量计算DAC曲线

## 2.4 探伤缺陷幅值确定

将超声波探伤仪增益调到与制作 DAC 曲线相同的位置。探伤探头与制作 DAC 曲线为同一探头。缺陷探测采用双面双侧,探测速度和方法按 GB 11345—1989 要求。找到缺陷回波最高位置,将示波屏上波幅调制到与制作 DAC 曲线相同高度,此时探伤仪上对应的 dB 值为计算缺陷当量孔径函数式的  $x$  数值(长横孔: $y=62.193e^{-0.0208x}$ ,短横孔: $y=60.044e^{-0.0243x}$ )。

## 2.5 横孔类缺陷当量孔径计算式推导

通常波幅高度与回波声压成正比。当  $l \geq 3N$ ( $l$  为超声波声场长度,  $N$  为近场区长度),超声波垂直入射时,超声波在横孔表面的反射类似球面波在柱面镜上的反射<sup>[2]</sup>。

### 2.5.1 类似长横孔状缺陷

#### (1) 长横孔理论回波声压

回波声压为:

$$P_f = \left[ P_0 \cdot F_S \cdot \frac{(D_f)^{0.5}}{2^{1.5} \lambda X^{1.5}} \right] e^{-\frac{2\alpha X}{8.68}}$$

式中  $P_0$  为波源起始声压,Pa;  $F_S$  为波源面积,  $m^2$ ;  $\lambda$  为波长,  $m$ ;  $X$  为孔距波源的距离,  $m$ ;  $\alpha$  为介质单程衰减系数,常数; $D_f$  为长横孔直径,  $m$ 。

#### (2) 缺陷孔径计算公式

同一波源上,任意两个不同孔径  $D_{f1}$  和  $D_{f2}$ ,不同距离的长横孔回波幅值(dB)差  $\Delta_{12}$  为:

$$\begin{aligned} \Delta_{12} &= 20 \lg \frac{P_{f1}}{P_{f2}} \\ &= 10 \lg \frac{D_{f1} X_2^3}{D_{f2} X_1^3} - 2 \lg \frac{e}{8.68} (\alpha_1 X_1 - \alpha_2 X_2) \\ &= 10 \lg \frac{D_{f1} X_2^3}{D_{f2} X_1^3} - 0.05 (\alpha_1 X_1 - \alpha_2 X_2) \end{aligned}$$

若已知孔径  $D_{f1}$ ,  $D_{f1}$  与  $D_{f2}$  的回波分贝差  $\Delta_{12}$ ,则距波源同一距离  $X$  上的孔径  $D_{f2}$  为:

$$\lg D_{f2} = \lg D_{f1} - 0.1 [\Delta_{12} + 0.05 (\alpha_1 - \alpha_2) X]$$

钢板厚度<200 mm,材质单程衰减系数很小,可忽略  $\alpha_1, \alpha_2$ ,则:

$$D_{f2} = 10^{(\lg D_{f1} - 0.1 \Delta_{12})} \quad (1)$$

长横孔 DAC 曲线函数表达式为:

$$y = 62.193e^{-0.0208x} \quad (2)$$

设在焊缝  $x$  深度处实测缺陷回波幅值为  $y_x$ ,则缺陷实测回波与长横孔 DAC 曲线图  $x$  处幅值差  $\Delta_{12}$  为:

$$\Delta_{12} = y - y_x = 62.193e^{-0.0208x} - y_x \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),则长横孔缺陷当量孔径  $D_{f2}$  计

算式为:

$$D_{f2} = 10^{(\lg D_{f1} - 6.2193e^{-0.0208x} + 0.1y_x)} \quad (4)$$

### 2.5.2 类似短横孔状缺陷

#### (1) 短横孔回波声压

短横孔长度小于波束界面尺寸。当  $l \geq 3N$  时,不考虑钢板衰减系数,超声波在短横孔上的回波声压为:

$$P_f = \frac{P_0 F_S L_f}{2\lambda X^2} \cdot \left( \frac{D_f}{\lambda} \right)^{0.5}$$

式中  $L_f$  为孔长度,  $m$ 。

#### (2) 缺陷孔径计算

同一波源上,任意两个不同孔径  $D_{f1}$  和  $D_{f2}$ ,不同长度  $L_{f1}$  和  $L_{f2}$ ,相同距离的短横孔回波幅值差  $\Delta_{12}$  为:

$$\Delta_{12} = 20 \lg \frac{P_{f1}}{P_{f2}} = 10 \lg \frac{D_{f1} L_{f1}^2}{D_{f2} L_{f2}^2}$$

短横孔 DAC 曲线函数为  $y=60.044e^{-0.0243x}$ 。

设已知  $D_{f1}, L_{f1}$ ,在焊缝  $x$  深度处实测缺陷回波幅值为  $y_x$ ,则缺陷实测回波幅值与短横孔 DAC 曲线图  $x$  处幅值差  $\Delta_{12}$  为:

$$\Delta_{12} = y - y_x = 60.044e^{-0.0243x} - y_x \quad (5)$$

则短横孔缺陷当量孔径计算式为:

$$D_{f2} = \frac{D_{f1} L_{f1}^2}{L_{f2}^2 10^{0.1 \Delta_{12}}} \quad (6)$$

## 3 坚孔状类缺陷当量孔径计算

### 3.1 人工反射体选择

坚孔状类(近根部类似点状)缺陷常见的有局部咬边、根部局部未熔合、熔穿、局部微裂纹等。这些缺陷大部分表面开口,探伤回波最高点往往在缺陷边棱处,缺陷边棱一般都呈波浪状,可以将缺陷边棱看作大小不同的圆弧组成。选择与试样相同材质、相同光洁度、不同厚度的钢板,制作不同直径的坚通孔,用 5P6×6K2 探头进行超声波探伤,制作波幅-孔洞直径(dB- $\phi$ )曲线。制作 dB- $\phi$  曲线的钢板厚度为 4.3, 5.2, 6.7, 7.8, 9.1, 13.6, 19.7 和 24.5 mm。探伤示意图如图 3。

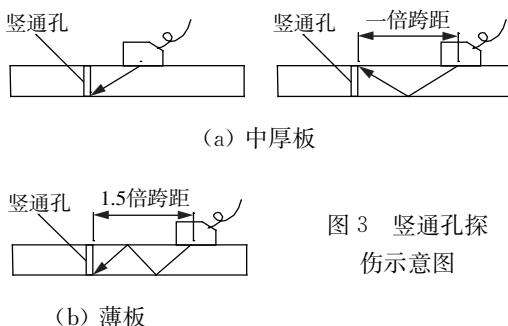


图 3 坚通孔探伤示意图

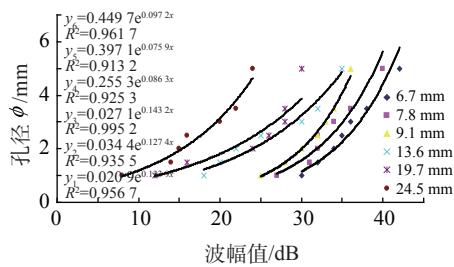


图 4 二次波探伤 dB- $\phi$  曲线及回归函数

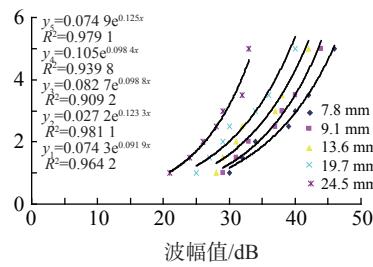


图 5 一次波探伤 dB- $\phi$  曲线及回归函数

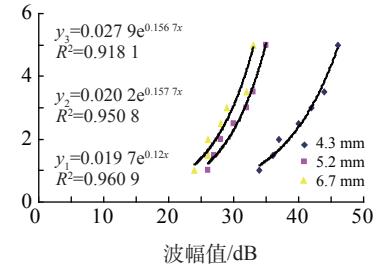


图 6 三次波探伤 dB- $\phi$  曲线及回归函数

中厚板用一、二次波探伤(图 3(a));竖通孔上只有边棱反射波幅最大,薄板用三次波探伤(图 3(b))。一、二和三次波探伤曲线及回归函数如图分别如图 4~6。

### 3.2 竖孔状缺陷当量孔径计算

探伤确定为“近焊缝根部类似点状”缺陷,用双面双探,找出回波最大幅值,确定缺陷深度(计算当量板厚)。计算竖孔类缺陷当量孔径时,根据钢板当量板厚,在 dB- $\phi$  曲线图上查找对应的  $\phi$  值,如果图上没有对应的板厚曲线,选择与实际当量板厚比较接近的两个板厚的回归函数试计算孔径,再用实际当量板厚进行内插计算缺陷当量孔径。

### 3.3 竖孔状缺陷计算方法验证

(1) 含气割缺口 Q345 钢板厚 22.0 mm。5P6 ×6K2 探头一次波缺口最高波幅 36 dB,二次波最高波幅 28 dB;用一次波 dB- $\phi$  曲线图计算当量孔径为 5.1 mm,二次波 dB- $\phi$  曲线图计算当量孔径 5.0 mm(实测孔径 6.1 mm)。

(2) Q235 钢板厚 12.2 mm,熔透对接焊缝一次波探伤,深度 9 mm 处点状缺陷波幅 36 dB,一次波 dB- $\phi$  曲线图计算当量孔径为 2.3 mm(实测孔径

(上接第 67 页)

地消除这一现象,此方法为实现钢轨踏面裂纹的快速检测和定位创造了条件。但是此方法仍存在一些不足,比如无法对裂纹深度作出较为准确的定量,由于钢轨中多个模式波的存在,解决裂纹尤其是斜裂纹的定量始终是一项具有挑战性的课题。

### 参考文献:

- [1] Jian X, Dixon S. Rayleigh wave interaction with surface breaking cracks[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(6):064906.
- [2] Daniel Hesse, Peter Cawley. A single probe spatial averaging technique for guided waves and its applica-
- [3] 李家伟,陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002:202—203.
- [4] 林玉书. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京:科学出版社,2004:123—134.
- [5] 薛喜年. MATLAB 在数字信号处理中的应用[M]. 北京:清华大学出版社,2003:45—63.
- [6] Rose JL. 固体中的超声波[M]. 美国:科学出版社,2004:134—155.
- [7] Edwards R S, Dixon S. Characterisation of defects in the railhead using ultrasonic surface waves [J]. NDT&E International, 2006(39):468—475.

2.5 mm)。

竖孔状(近根部类似点状)缺陷计算当量孔径比实测值略小,但和实际尺寸比较接近。

### 4 小结

钢结构熔透焊缝中(体积型)缺陷状态主要有类似横孔状和竖孔状,两类缺陷的超声波回波信号各有自身特征,根据回波特征选择、制作适合的超声波探伤对比反射体。对于类似于横孔状的缺陷,选择 GB 11345 和 JG/T 203 标准试块上的横孔为对比反射体,测定试样与对比反射体之间表面能耗损失,绘制探伤用 DAC(距离-波幅)曲线,推导缺陷当量孔径计算式;对于类似于竖孔状的缺陷,制作专用竖通孔反射体,建立 dB- $\phi$  缺陷计算图,计算缺陷当量孔径。

### 参考文献:

- [1] 杨晓东,尚建丽,张林绪. 建筑钢结构网架焊缝超声波探伤中等效试块的确定[J]. 工业建筑, 2003, 33(357):242—244.
- [2] 全国锅炉压力容器无损检测人员资格考核委员会. 超声波探伤[M]. 北京:中国锅炉压力容器安全杂志社, 1995.

tion to surface wave rail inspection[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, 2007(11):2344—2356.

- [3] 李家伟,陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002:202—203.
- [4] 林玉书. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京:科学出版社,2004:123—134.
- [5] 薛喜年. MATLAB 在数字信号处理中的应用[M]. 北京:清华大学出版社,2003:45—63.
- [6] Rose JL. 固体中的超声波[M]. 美国:科学出版社,2004:134—155.
- [7] Edwards R S, Dixon S. Characterisation of defects in the railhead using ultrasonic surface waves [J]. NDT&E International, 2006(39):468—475.