

# 海洋工程超声波检验新型 API 试块的设计

李鹏频

(海洋石油工程股份有限公司, 珠海 519000)

**摘要:** 在海洋工程结构的超声波检测中,常需要携带大量超声波检测标准试块和参考试块进行仪器性能的校准,调试和复核,而试块重量较为沉重,出海或出差实施现场检验时,难以带全所有标准试块和参考试块。为了解决该问题,结合工程实际,设计并制作了符合 API 要求的新型试块,该试块同时具有设备性能校准,调试和复核的功能。

**关键词:** 海洋工程;超声波检测;新型试块;API

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2020)02-0069-05

## Design of a new type of API block for ultrasonic testing of offshore engineering

LI Pengpin

(Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** In the offshore engineering ultrasonic testing, due to the complex structure, it is often necessary to carry a large number of ultrasonic testing standard and reference blocks for the instrument calibration and verification. However, the weight of the blocks is relatively heavy, so it is difficult to carry all calibration and reference blocks while on a business trip or offshore inspection. In order to solve this problem, combined with the engineering practice, a new type API block having both calibration and verification functions was designed and manufactured.

**Key words:** offshore engineering; ultrasonic testing; new type block; API

在海洋工程领域,大多数项目的无损检测都需要在海上进行,海洋工程结构的超声波检验常采用美国石油协会(API)标准,涉及超声波检测的试块包括国际焊接协会(IIW)试块和美国石油协会(API)参考试块两种,一般调节仪器需先在 IIW 试块上调节声速、范围,测定入射点和测定折射角等,然后再利用 API 参考试块制作距离-波幅曲线(DAC)。如果现场需要检测多个不同厚度的焊缝,则需要使用多个 API 参考试块调节。超声波检测试块重量较重,出海和出差进行现场检验时,难以带全所有系列的参考试块。当进行不同厚度材料的检测时,如果没有带相应厚度的 API 试块,现场检测校准和测试亦会有一定的困难。

笔者结合国际焊接协会(IIW)试块和美国石油

协会(API)系列参考试块的各自特点,设计出一种新型的满足 API-RP-2X *Recommended practice for ultrasonic and magnetic examination of offshore structural fabrication and guidelines for qualification of technicians* 检验标准要求的超声波检验通用试块。

## 1 试块的设计和加工

### 1.1 试块的材料确定

目前海洋工程类项目中,钢结构所使用的碳钢材料一般为 DH36、JIS SM490YB、Q235B 和 20 钢。而在各个项目的检验要求中,材料 Q235B 常用于制作成品工字梁,此类结构一般只需要进行磁粉检测,故不考虑 Q235B 材料。经过使用对比,DH36、JIS SM490YB 和 20 钢的声学性能基本一致。在声学性能一致的情况下,20 钢在制作和价格上更具优势,故最终确定以 20 钢作为新型 API 试块的设计材料。

收稿日期: 2019-04-22

作者简介: 李鹏频(1985—),男,工程师,主要从事无损检测工作

通信作者: 李鹏频, lipin0801@126.com

## 1.2 试块反射体设计

考虑到功能性及便携性,试块需具有 IIW 标准试块和 API 参考试块的各自特点,以及 IIW 标准试块和 API 参考试块的功能,包括水平线性及垂直线性测定、声速测定、入射点及折射角测定、绘制距离-波幅曲线和根部灵敏度校验等功能。试块中应包含 API 标准所要求的  $\phi 1.6$  mm 横通孔、T 形、K 形、Y 形管状节点检验所用的根部槽和用于调试仪器基本参数的圆弧。

### 1.2.1 $\phi 1.6$ mm 横通孔位置确定

API-RP-2X《海上结构制造超声波检测和磁粉检测推荐作法及无损检测人员技术资格鉴定指南》标准要求,当执行 A 级验收标准时,则参考等级校准使用的内部反射体是标准中 A 级参考试块或者规范指定的类似试块里直径为 1.6 mm 的横通孔。当执行 C 级验收标准时,使用直径为 1.6 mm 的横通孔作为内部反射体的参考等级。从标准中可以看出,API-RP-2X 验收标准 A 级和验收标准 C 级都需要使用直径 1.6 mm 的横通孔来进行检测灵敏度校准。

根据项目调查统计,海洋工程海上超声检测一般壁厚在 60 mm 以下,以 30~40 mm 壁厚的焊口数量居多,为满足海上结构超声波检测需求,选择厚度为 100 mm 的试块,在 6,20,40,50,70,90 mm 深的位置处钻孔(见图 1)。通过上下翻转试块能够获得 6,10,20,30,40,50,60,70,80,90,94 mm 深度的对比反射体,从而达到满足海上结构超声波检测的要求。

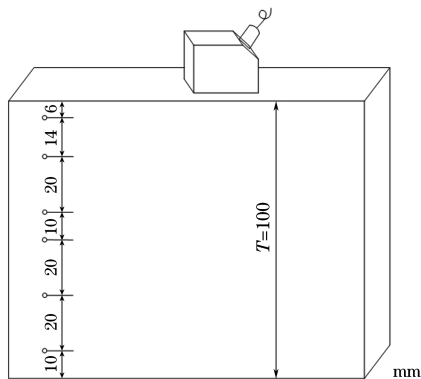


图 1  $\phi 1.6$  mm 横通孔的尺寸示意

### 1.2.2 根部槽位置

在海洋工程钢结构中存在较多的 T、K、Y 节点焊口,这些 T、K、Y 节点的根部区域只能进行单侧检验。API-RP-2X 标准要求,当执行 A 级验收标准时,如果对根部区域只能进行单侧检测,推荐使用  $70^\circ$  探头检测,参考等级的校准反射体应使用 1.6 mm 深的表面槽。当执行 C 级验收标准时,参考等级的

校准反射体应使用 1.6 mm 深的表面槽。从标准中可以看出,API-RP-2X A 级验收标准和 C 级验收标准都需要使用深度为 1.6 mm 的表面槽来进行根部灵敏度校准。因此试块设计还需考虑适用于 T、K、Y 节点检验调节的根部槽。

根据调查统计得出,海上 T、K、Y 节点的支管壁厚一般在 40 mm 以下,可用厚度为 15,25,45 mm 的表面槽来制作根部灵敏度曲线。考虑到试块大小及试块重量,采用台阶阶梯的形式将根部槽加工在试块的阶梯上。台阶阶梯试块结构示意图如图 2 所示。

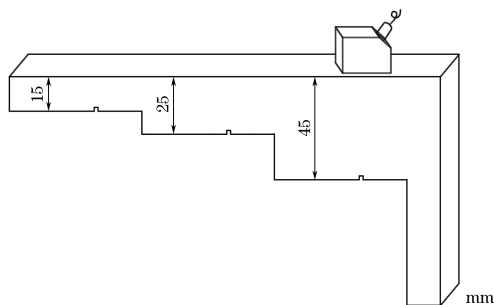


图 2 根部槽台阶阶梯结构示意图

### 1.2.3 圆弧的设计形式

日常仪器的性能调试,还需测定材料声速、探头的入射点、折射角以及设置检测范围,这些性能可通过圆弧来实现。日常的 IIW 试块调节斜探头的声速和范围需通过圆弧二次反射波来进行,这一般适用于横波调试,纵波斜探头是无法通过圆弧来调节声速和范围的,考虑到这一因素,笔者参考 CSK-IA 试块的结构形式<sup>[1]</sup>,将试块的圆弧设计成同侧双圆弧形,从而满足仪器调试的功能,其结构示意图如图 3 所示。

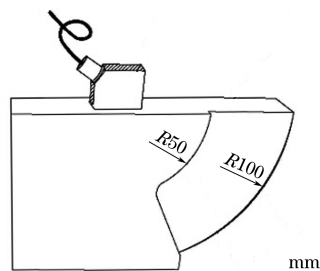


图 3 圆弧的结构示意

## 1.3 试块尺寸

确定了  $\phi 1.6$  mm 横通孔位置、TKY 根部槽位置和圆弧的设计形式几个基本要素后,还需要考虑试块的具体尺寸。试块的尺寸取决于各个阶梯的长度以及横通孔的深度。

### 1.3.1 试块阶梯长度

API-RP-2X 标准要求根部槽的位置需离端角

最少 38 mm,以除去端角回波的干扰,为节省试块空间,将根部槽的位置设置在离端角 38 mm 处。受阶梯设计的影响,在根部槽的另一侧也存在一个端角,但此处的端角方向朝下,在调试中并不会产生端角反射的现象。将根部槽到另一侧端角的距离设置为 20 mm,预留一定距离的水平位置,使探头能较好地接收根部槽的反射信号。同时该阶梯还可用于制作传输修正曲线,便于现场检测中材料及表面状态差异导致的声能损失。传输修正曲线通过使用相同角度的一发一收探头来制作。常用的探头角度为

45°,60°和 70°。使用 70°探头时,对于大壁厚焊缝一般采用一次波检测,故对于 45 mm 的台阶传输修正只需将一发一收探头分别放在阶梯面的上下表面进行测定。45°和 60°探头的传输修正曲线可使用两个相同角度探头放在同侧或对侧,通过前后移动探头获取峰值信号来制作。传输修正曲线制作的声束路径示意如图 4 所示,可以算出 70°探头离 45 mm 深台阶面的偏移距离为  $45 \text{ mm} \times \tan 70^\circ = 123.6 \text{ mm}$ 。因此在 45 mm 台阶的一侧需留足够空间以保证声束传播过程中无干扰。

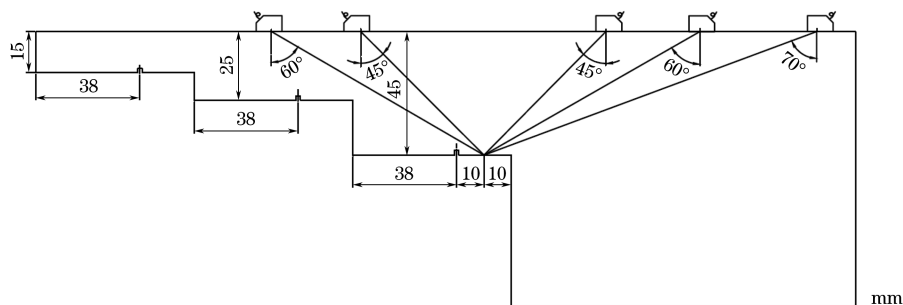
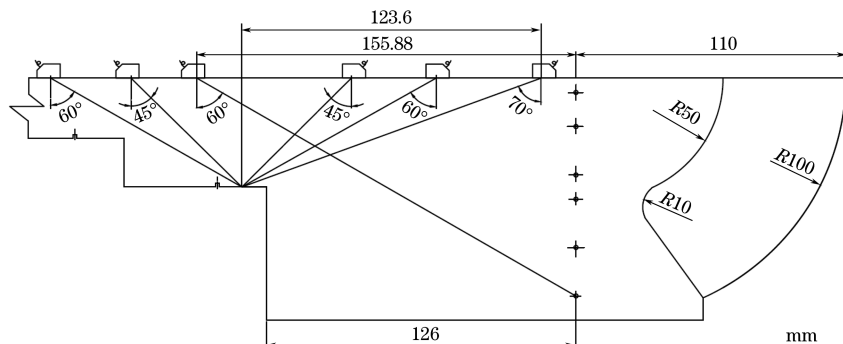


图 4 试块阶梯尺寸示意

### 1.3.2 $\phi 1.6 \text{ mm}$ 横通孔水平位置确定

采用横通孔制作 DAC 曲线时,此试块仅需采用一次波便可制作。将横通孔的位置设置为靠近圆弧侧,从而避免横通孔对根部槽产生干扰,通过在圆弧侧使用一次波直射法制作 DAC 曲线。根据勾股定理,使用 60°探头时,可以算出最深处的横通孔需要的水平距离为 155.88 mm ( $90 \text{ mm} \times \tan 60^\circ$ )。使用 70°

探头时,对于大壁厚一般采用一次波检测,因此使用 50 mm 深的横通孔就能够满足 70°探头现场检测要求,通过公式可以计算出 70°探头移动需要的水平距离为 137.37 mm ( $50 \text{ mm} \times \tan 70^\circ$ )。为节省试块空间,可利用阶梯中部分位置制作 DAC 曲线,同时考虑 70°探头制作传输修正的偏移距离要求。横通孔水平位置尺寸示意如图 5 所示。

图 5  $\phi 1.6 \text{ mm}$  横通孔位置示意

## 1.4 试块加工

结合上述因素,最终绘制出适用于 API 检验标准的简易通用试块设计图(见图 6),试块的基本尺寸如下。

- (1) 试块长 410 mm,高 100 mm,厚 35 mm。
- (2)  $\phi 1.6 \text{ mm}$  的横通孔距离边缘 110 mm,共 6 个孔,深度分别是:6,20,40,50,70,90 mm。
- (3)  $1.6 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$  方形槽共 3 个,每个距离

边缘 38 mm,槽距离下一级台阶 20 mm,台阶厚度分别为 15,25,45 mm。

- (4) 第一圆弧的半径为 100 mm,第二圆弧的半径为 50 mm。

图纸设计完毕后,委托工厂依照图纸加工成型,成型的试块实物如图 7 所示。

## 1.5 试块功能

该新型 API 通用试块具有以下仪器校准和调

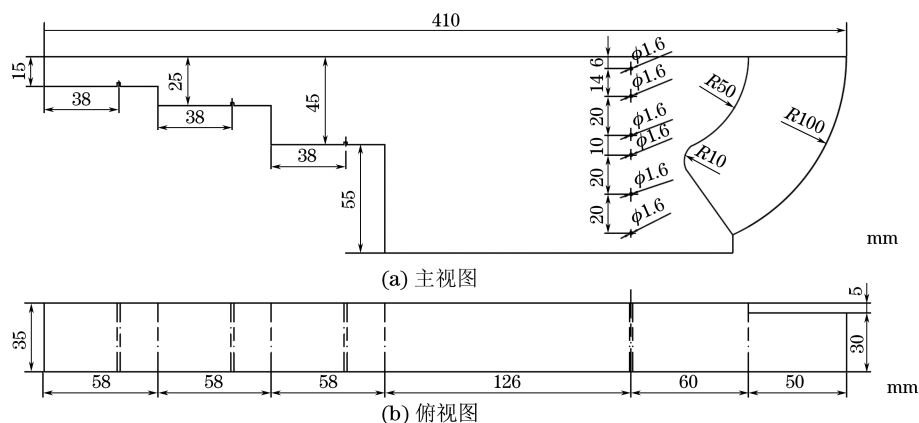


图6 新型试块的尺寸示意

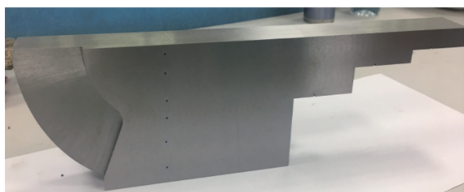


图7 新型试块实物图

试功能:校验水平线性、垂直线性、动态范围,测定入射点、声速和折射角,调整纵波横波检测范围和扫描速度,调节检测灵敏度,绘制距离-波幅曲线,并可以用于 T、K、Y 根部缺陷的对比参考。各功能的具体操作如下。

(1) 调整纵波、横波检测范围和扫描速度(时基线比例):利用试块上 R50 mm 和 R100 mm 尺寸。

(2) 校验仪器的水平线性、垂直线性和动态范围:利用试块上高度 100 mm 和厚度 35 mm 尺寸。

(3) 测定斜探头的入射点:用 R100 mm 或者 R50 mm 的圆弧反射面测试。

(4) 测定横波和纵波声速:用 R100 mm 和 R50 mm 的圆弧反射面测试。

(5) 测定仪器和探头的组合灵敏度:利用 R50 mm 或 R100 mm 圆弧面测试。

(6) 测定斜探头的折射角:考虑近场区的影响,折射角为  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  时,需要用深度超过 40 mm 的  $\phi 1.6$  mm 直径孔调校;折射角为  $70^\circ$  时,需要用深度超过 10 mm 的  $\phi 1.6$  mm 直径孔调校。

(7) 测定横波距离-波幅曲线:利用不同深度的  $\phi 1.6$  mm 横通孔调校,通过翻转  $45^\circ$  探头可以直射到 6, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 94 mm 深度的横通孔,  $60^\circ$  探头可以探测到 6, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 90 mm 深度的横通孔,  $70^\circ$  探头可以探测到 6, 10, 20, 30, 40, 50 mm 深度的横通孔。

(8) 测定根部距离-波幅曲线:利用不同厚度阶

梯的槽来校准,适用于根部位置 15~45 mm 的焊缝。

(9) 测定表面补偿修正曲线:利用不同厚度阶梯的平面区域,适用于焊缝厚度 15~45 mm 的焊缝。

## 2 标准参考试块校验

传统的 API 试块是利用试块多次翻转以及声束直射和多次反射来制作 DAC 曲线的,文中新型试块采用一次波直射法制作 DAC 曲线。根据 Snell 定理,当横波入射角不小于  $33.2^\circ$ ,横波通过钢和空气界面时,声束在反射界面会发生全反射,故理论上,在排除表面粗糙等干扰因素外,多次反射过程中没有声能损失。笔者通过下述试验来对比两者的差异性。

采用日常检测中常用的超声波 5Z10 \* 10A60 探头(汕头市超声仪器研究所有限公司制造),在新型 API 试块,传统的厚度  $T$  分别为 12.7, 19.1, 38.1, 50.8 mm 的 API 试块上进行试验。将探头在新型试块上进行声速、范围、入射点和折射角的测定,然后利用新型试块上的一系列横通孔来制作 DAC 曲线。利用此 DAC 曲线,通过在不同厚度的传统 API 试块上进行声束一次波、二次波和三次波反射校验,观察仪器上波幅差值,记录分贝差。试验对比数据如表 1 所示(试验数据为多次数据的平均值)。

通过对比数据可以看出,在新型试块和传统 API 试块上两者的  $\phi 1.6$  mm 横通孔反射体分贝差基本保持在 0.5 dB 的范围内,试验证明声束在多次反射过程中的声能损失很小,在可允许范围内,能符合现场使用情况。

为验证距离根部槽 20 mm 处的端角对根部灵敏度调节的影响,笔者使用  $70^\circ$  探头,利用传统的厚度  $T$  分别为 12.7, 38.1, 50.8 mm 的 API 试块上的根部槽制作 DAC 曲线,将新型 API 试块上的 3 个根

部槽的 70° 反射波幅与传统试块上制作好的 DAC 曲线进行对比,比较两者分贝差,结果如表 2 所示。

从数据可以看出两者的分贝差很小,基本不会影响根部槽的灵敏度调校。

表 1 横通孔试验数据对比

| 参数             | 传统试块               |                    |                    |                    |                    |                    |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                | T=12.7 mm<br>试块一次波 | T=19.1 mm<br>试块二次波 | T=12.7 mm<br>试块三次波 | T=50.8 mm<br>试块一次波 | T=50.8 mm<br>试块二次波 | T=38.1 mm<br>试块三次波 |
| API 试块反射体深度/mm | 9.5                | 23.9               | 28.6               | 38.1               | 63.5               | 85.7               |
| 分贝差值平均值/dB     | -0.2               | -0.1               | -0.5               | -0.4               | -0.2               | -0.5               |

表 2 根部槽数据对比

| 参数                 | T=15 mm | T=25 mm | T=45 mm |
|--------------------|---------|---------|---------|
| 与传统试块根部<br>槽分贝差/dB | -0.12   | -0.18   | -0.06   |

完成仪器性能调试及 DAC 曲线的制作,调试过程中不需要经常更换试块,可降低挪动试块的安全风险。现该试块已应用于海洋工程海上安装项目和陆地建造项目中,在使用方便快捷的同时还创造出了一定的经济效益。

### 3 结语

文中设计的新型 API 试块结构简单,现场携带方便。使用新型 API 试块只需在一个试块上就能

### 参考文献:

- [1] NB/T 47013.3—2015 承压设备 无损检测 第三部分:超声波检测[S].

(上接第 64 页)

### 参考文献:

- [1] 沈功田,李建,武新军. 承压设备脉冲涡流检测技术研究及应用[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 49-58.
- [2] 武新军,张卿,沈功田. 脉冲涡流无损检测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8):1698-1712.
- [3] BOWLER J R, HARRISON D J. Measurement and calculation of transient eddy-currents in layered structures [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive, 1992,28(1):241-248.
- [4] YE C, SU Z, ROSELL A, et al. Decay time method with PEC and MR sensor for linearly measurement of material electrical conductivity [J]. NDT & E International, 2019, 102:169-174.
- [5] SOPHIAN A, TIAN G Y, TAYLOR D, et al. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed Eddy current NDT [J]. NDT&E International, 2003, 36(1):37-41.
- [6] 克劳斯·巴克豪斯. 多元统计分析方法[M]. 上海:上海人民出版社, 2009.
- [7] 张文彤. SPSS 统计分析基础教程[M]. 北京:高等教育出版社, 2017.

(上接第 68 页)

### 参考文献:

- [1] 李嘉荣,熊继春,唐定中. 先进高温结构材料与技术(上)[M].北京:国防工业出版社,2016:1-13.
- [2] MASON W P, MCSKIMIN H J. Attenuation and scattering of high frequency sound waves in Metals and glasses[J]. J. Acoust. Soc. Am.,1947,19:466-473.
- [3] HUNTINGTON H B. On ultrasonic scattering by polycrystals[J]. J. Acoust. Soc. Am.,1950,22:362-364.
- [4] 林莉. 合金钢显微组织超声无损表征研究[D].大连:大连理工大学,2003.
- [5] 李喜孟,林莉. 超声波频谱分析技术[M].北京:机械工业出版社,1999.
- [6] 张萌,轩福贞. 汽轮机转子钢蠕变损伤的非线性超声评价[J].机械工程学报,2016,52(2): 76-81.
- [7] 孙锦中,马世伟,蔡叶青,等. P91 钢高温热损伤的二次谐波评价[J].声学技术,2015, 34(6): 510-514.
- [8] 郭亚华,唐佳,王伏喜,等. 高铬铸铁组织与超声声速关系的测定[J].无损检测, 2011,33(12):62-65.
- [9] 张磊,彭学文,马芹征,等. 汽轮机粗晶螺栓的超声波诊断技术[J].无损探伤,2016,40(5):46-48.
- [10] 万刚,吴伟,王茹,等. 钛-钢爆炸焊复合层的超声成像检测[J]. 无损检测,2016,38(7):36-39.