

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.01.030

# 在役 783 螺栓新型检测技术的研究

孟永乐,薛开封,林琳

(西安热工研究院有限公司,陕西 西安 710054)

**摘要:**研究了在无需拆卸的情况下对 783 螺栓进行检测的装置及原理,并通过该装置对 783 螺栓杆部人工缺陷、螺纹、螺纹人工缺陷、螺栓伪缺陷、螺栓自然裂纹的静态波形进行了分析和研究。结果表明,在机组调停或较短检修期中,在无需拆卸的情况下实现了对该类在线螺栓的加热孔底部进行检测的要求,及时掌握螺栓的质量,避免设备事故的发生。

**关键词:**783 螺栓;检测装置;检测原理;波形分析

中图分类号: TG115

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2019)01-0116-06

## Research on Detecting 783 Bolts From Inner Hole

MENG Yongle, XUE Kaifeng, LIN Lin

(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The detection device and principle of 783 bolts without disassembly were studied, and the static waveforms of artificial defects, threads, artificial defects, false defects and natural cracks of 783 bolts were analyzed and studied through the device. The results show that during the unit mediation or short maintenance period, the requirements of detecting the bottom of the heating hole of this kind of on-line bolt are realized without disassembly. Timely the quality of bolts can be grasped in time, and to avoid equipment accidents.

**Key words:** 783 bolts; detection device; detection principle; waveform analysis

随着国内超超临界火电机组的迅速发展,耐高温、高强度、抗疲劳性能优良的 Inconel Alloy783 镍基高温合金被广泛引用于制作调节汽门和主汽门的紧固螺栓。此类螺栓在安装紧固过程中通常使用热紧安装的方式,加热孔底部易超温,过热氧化损伤母材,裂纹萌生于烧损处,另外加热孔底部截面的突变形应力集中,故在正常服役条件下裂纹扩展导致螺栓发生断裂;螺栓服役过程中因环境温度变化等产生交变应力,以及材料本身在高温环境下性能的劣化,导致部分螺栓也会发生早期疲劳断裂及一次性脆断<sup>[1]</sup>。在实际检修中很多情况下螺栓不具备拆除条件,标准规定的检测方法无法实施,有必要寻找一种新的检测方法,在机组调停或较短检修期中,在无需拆卸的情况下对该类在线螺栓的加热孔底部进行检测,及时掌握螺栓的质量,避免缺陷扩展造成设备事故的发生。

## 1 主要研究内容

### 1.1 783 螺栓内孔检测装置设计及检验原理

根据 783 螺栓的规格、材质、加热孔尺寸,设计内检探头的外形、晶片尺寸、检测频率、接插件形式、助探杆外形;设计螺栓纵波试块与螺栓横波试块,纵波试块用于 783 螺栓声学特性研究,横波试块用于 783 螺栓缺陷检测研究<sup>[2,3]</sup>。

### 1.2 783 螺栓缺陷波形研究

对 783 螺栓杆部人工缺陷、螺纹、螺纹人工缺陷、螺栓伪缺陷、螺栓自然裂纹的静态波形进行分析和研究<sup>[4]</sup>。

## 2 783 螺栓的声学特性

GH783 (国外牌号 INCONEL783) 合金由美国 Special Metals 公司开发,是一种新型的抗氧化型低膨胀镍基高温合金,用于航空发动机的间隙控制件,近年来德国西门子公司将其用于 600℃ 超超临界机组汽轮机用螺栓,其合金含量远大于 DL/T694-2012《火力发电厂高温紧固件技术导则》试块用钢 20G/45G。由于超声波的声速与传播介质的密度、弹性模量、泊松比油管,因此 783 螺栓中超声声速与试块用钢 20G/45G 声速差异较大,从而引起缺陷定位

收稿日期: 2018-08-06

作者简介: 孟永乐(1981-),江西南昌人,硕士,工程师,主要从事超声无损检测的工作。电话:15891799668,

E-mail: mengyongle@tpri.com.cn

存在较大差异。为解决上述问题,本次试验设计螺栓纵波试块与螺栓横波试块用于 783 螺栓声学性能研究。

2.1 783 螺栓试块的设计

783 螺栓试块材质为 GH783 (国外牌号 INCONEL783)合金,783 螺栓试块分为螺栓纵波试块和螺栓横波试块,螺栓纵波试块主要用于纵波在 783 螺栓中传播速度的测量,螺栓纵波试块主要用于横波在 783 螺栓中传播速度的测量。螺栓纵波试块尺寸为 50 mm(长)×25 mm(宽)×10 mm(高),如图 1 所示。螺栓横波试块尺寸为 R31 mm(半径)×10 mm(宽),如图 2 所示。螺栓人工缺陷试块,人工缺陷位于螺栓的螺纹和螺杆部位,人工缺陷 10 mm(长)×1 mm(宽)×2 mm(深),采用电火花方法制备,如图 3 所示。

2.2 纵波声速测量

纵波声速测量试验设备分别为超声检测仪器(型号:汉威 610e)、直探头(5MHzφ14、5MHzφ14)、螺栓纵波试块,利用螺栓纵波试块的 10、25、50 mm 的 3 个底面进行声速测量,具体测量图见图 4,纵波声速测量结果见表 1。试验结果表明:纵波平均声速为 5 632 m/s,纵波声速不随超声波频率改变而变化。

2.3 横波声速测量

横波声速测量试验仪器分别为超声检测仪器(型号:汉威 610e)、斜探头(5MHz13×1 345°/60°/70°、2.5MHz13×1 345°/60°/70°)、螺栓横波试块,利

表 1 纵波声速测量结果

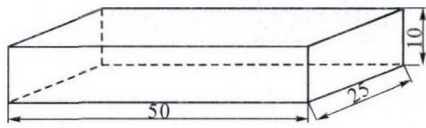
| Tab.1 Measurement results of p-wave sound velocity |          |         |          |
|----------------------------------------------------|----------|---------|----------|
| 反射面尺寸/mm                                           | 声波频率/MHz | 晶片尺寸/mm | 平均声速 m/s |
| 10                                                 | 5        | φ14     | 5 593    |
| 25                                                 | 5        | φ14     | 5 650    |
| 50                                                 | 5        | φ14     | 5 611    |
| 10                                                 | 2.5      | φ14     | 5 676    |
| 25                                                 | 2.5      | φ14     | 5 605    |
| 50                                                 | 2.5      | φ14     | 5 654    |
| 纵波平均声速为 5 632 m/s                                  |          |         |          |

用螺栓横波试块的 R31mm 的半圆弧面进行声速测量,具体测量图见图 5,纵波声速测量结果见表 2。试验结果表明:横波平均声速为 2 977 m/s,横波声速不随超声波频率改变而变化。

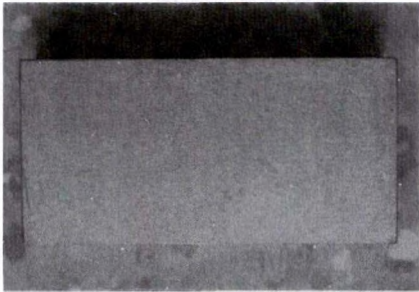
表 2 横波声速测量结果

| Tab.2 Measurement results of shear wave sound velocity |      |       |       |       |
|--------------------------------------------------------|------|-------|-------|-------|
| 反射面尺寸                                                  | 声波频率 | 入射角度  | 晶片尺寸  | 平均声速  |
| /mm                                                    | /MHz | / (°) | /mm   | m/s   |
| 31                                                     | 5    | 45    | 13×13 | 2 977 |
| 31                                                     | 5    | 60    | 13×13 | 2 978 |
| 31                                                     | 5    | 70    | 13×13 | 2 979 |
| 31                                                     | 2.5  | 45    | 13×13 | 2 975 |
| 31                                                     | 2.5  | 60    | 13×13 | 2 975 |
| 31                                                     | 2.5  | 70    | 13×13 | 2 976 |
| 横波平均声速为 2 977 m/s                                      |      |       |       |       |

根据上述测量的纵波声速和横波声速可计算出螺栓内检探头 45°检测声束的纵波入射角度,经计算纵波入射角度为 40°。

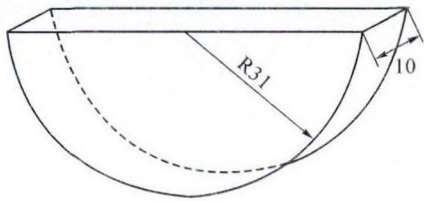


(a)螺栓纵波试块示意图

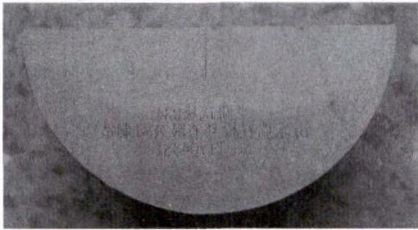


(b)螺栓纵波试块实物图

图 1 螺栓纵波试块  
Fig.1 Longitudinal wave test sample of bolts



(a)螺栓横波试块示意图



(b)螺栓横波试块实物图

图 2 螺栓横波试块  
Fig.2 Shear wave test sample of bolts

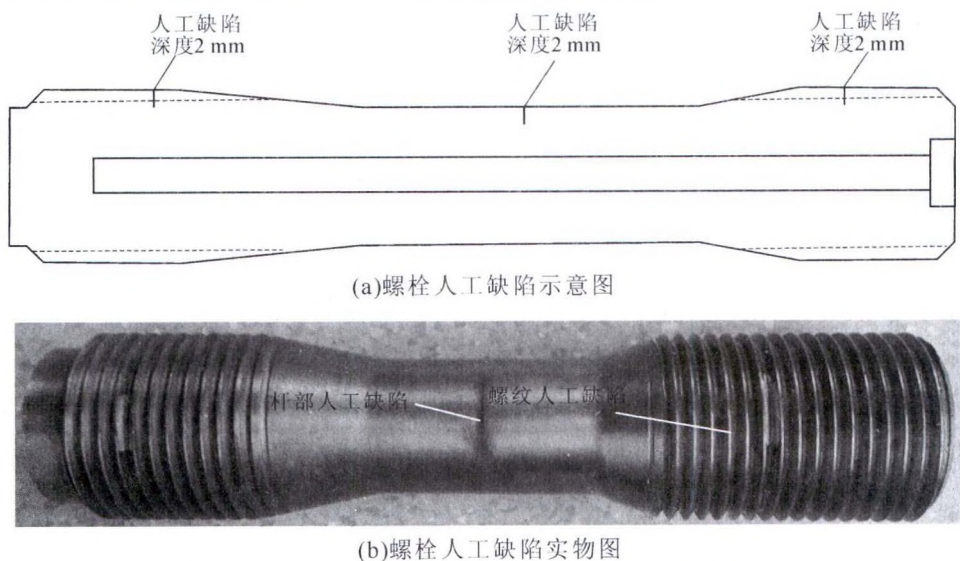
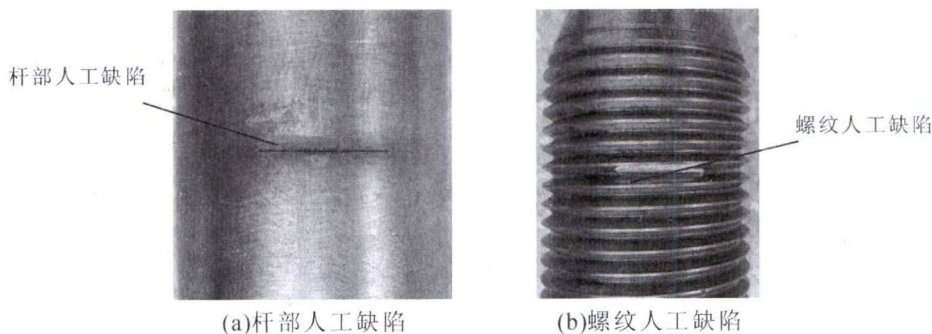


图3 螺栓人工缺陷试块

Fig.3 Test sample of artificial defects of bolts

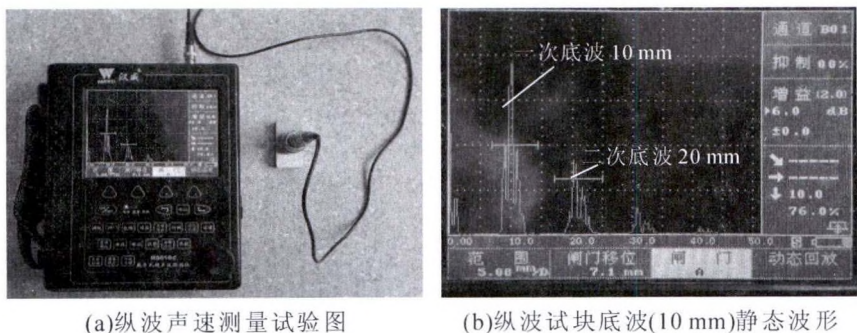


图4 纵波声速测量

Fig.4 Measurement of p-wave sound velocity

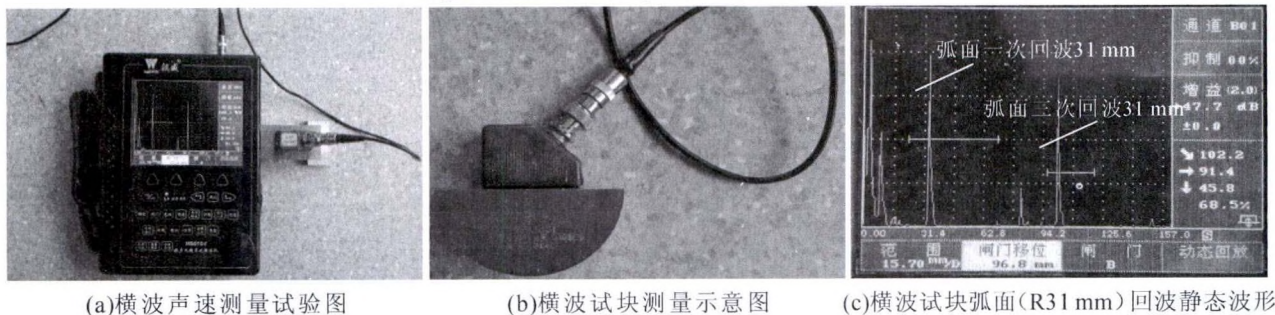


图5 横波声速测量

Fig.5 Measurement of shear wave sound velocity

### 3 783 螺栓内孔检测工艺研究

#### 3.1 783 螺栓内孔检测装置设计及检测原理

(1)783 螺栓内孔检测装置设计 本研究采用

超声法对 783 螺栓进行内容检测, 设计一套超声检测装置(检测探头 2.5 MHz $\times$ 6 mm45°、助探杆及探线), 如图 6 所示。内检探头外形为胶囊状, 其探头外径与螺栓加热孔内孔一致。助探杆与内检探头通过

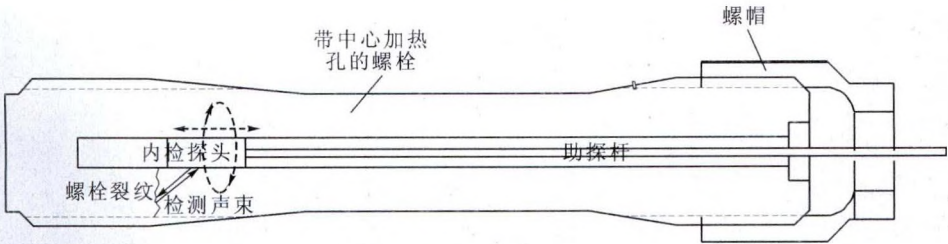


图 6 螺栓内检示意图  
Fig.6 Schematic diagram of bolt internal inspection

螺纹连接,内检探头接插件与探线连接,连接后的探线穿过助探杆连接超声检测仪。

(2)783 螺栓内孔检测原理 检测前,在 783 螺栓加热孔注入耦合剂,然后借助助探杆将内检探头伸入 783 螺栓加热孔。为确保 783 螺栓危害性裂纹的检出,内检探头需在加热孔内部在轴向方向前后移动和做自转转动,使检测声束覆盖 783 螺栓全体。图 6 中红色线条为裂纹,内检探头的伸入发射的检测声束入射到裂纹,裂纹反射回波回到内检探头,在超声检测仪上显示缺陷信号,通过缺陷信号特征,判定螺栓质量。

3.2 783 螺栓缺陷波形分析

(1)783 螺栓杆部人工缺陷波形分析 图 7 为螺栓杆部人工缺陷检测图,内检探头从螺栓加热孔缓慢伸入,当探头移动到螺栓杆部时,螺栓杆部形状为管形,因此在超声检测仪中不会出现缺陷波,当探头移动至螺栓杆部人工缺陷附近,检测声束入射到人工缺陷时,人工缺陷为面形缺陷与杆部形成检测声束的端角反射,因此在超声检测仪屏幕呈现单束波峰,该波峰为杆部人工缺陷回波,静态波形为单束、尖锐状波形,如图 7(c)所示。

(2)783 螺栓螺纹波形分析 因螺栓结构特点,检测声束入射到螺纹处,螺纹反射回波在超声检测仪中形成复杂波形,为此需要进行螺纹波分析。内检探头在螺栓加热孔中会出现两种螺纹静态波形,探头位于螺栓加热孔根部时静态波形为图 8(a)~(c),探头在移动和自转过程中时静态波形为图 8(d)~(f)。

由图 8 可知,螺纹波静态波形为多个波峰组成的波峰群,各波峰高度均不同,形状类似于“手”状。图 8(a)~(c)中三个波峰之间距离分别是 4.6 mm、4.2 mm,图 8(d)~(f)中三个波峰之间距离分别是 4.7 mm、4.5 mm。结果表明:螺纹波的多个波峰之间距离为等距近似相同。这主要是螺距相同,产生螺纹波峰距离近似相同;各波峰高度不同,主要是螺纹处于检测声束不同位置引起。

(3)783 螺纹人工缺陷波形分析 图 9 为螺纹人工缺陷检测图,内检探头从螺栓加热孔缓慢伸入,当探头移动至螺纹人工缺陷附近,检测声束入射到人工缺陷时,人工缺陷为面形缺陷,由于人工缺陷深度 2 mm 较小,小于螺纹反射面积,因此在超声检测仪屏幕呈现高度较小的波峰。由于人工缺陷位于两螺纹根部之间,因此人工缺陷波峰位于两螺纹波之间,具体波形如图 9(c)所示。

(4)783 螺栓伪缺陷波形分析 内检探头在探头移动检测中,在螺栓变径部位会出现伪缺陷回波现象,如图 10 所示,伪缺陷静态波形伪单束状波峰,导致缺陷误判。伪缺陷产生分析:根据超声波波形装换与反射折射定律可知,超声波的第三临界角 33.2°,内检探头 45°检测声束在图 10(a)中螺栓变径部位的入射角度会小于 33.2°,从而产生变形纵波入射到加热孔表面,因此在超声检测仪中形成单束波峰。

(5)783 螺栓自然裂纹波形分析 图 11 为螺栓自然裂纹检测图,裂纹为斜 45°分布,内检探头在裂纹附近时的静态波形为图 11(b)所示,检测声束入射

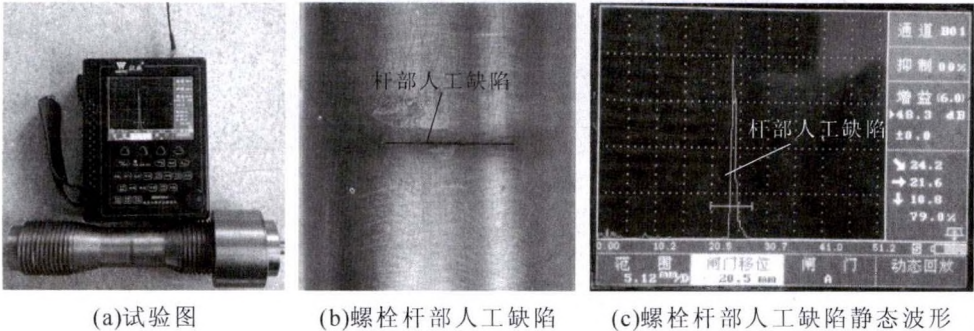


图 7 螺栓杆部缺陷检测图  
Fig.7 Defect detection diagram of bolt rod part

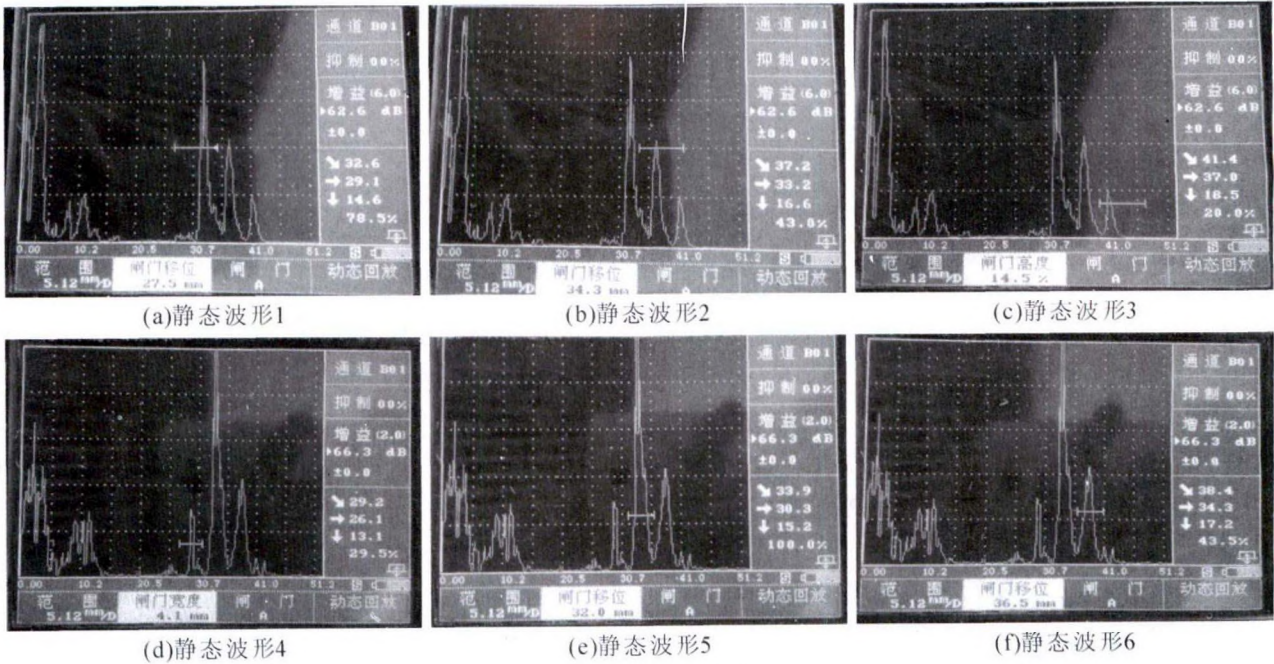


图8 螺纹波静态波形  
Fig.8 Static waveform of thread wave

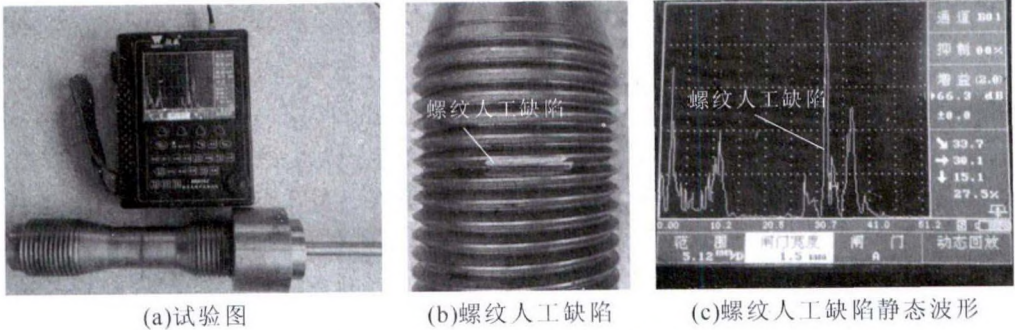


图9 螺纹人工缺陷缺陷检测图  
Fig.9 Artificial defects detection diagram of thread

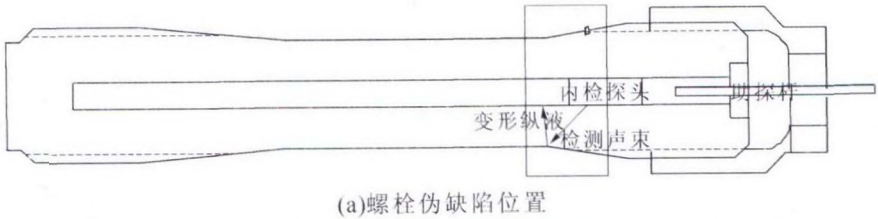
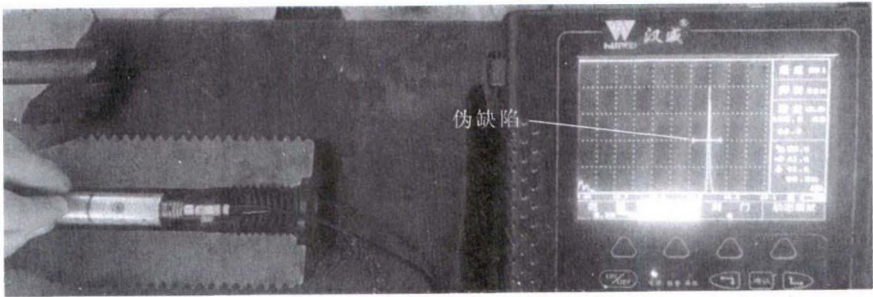
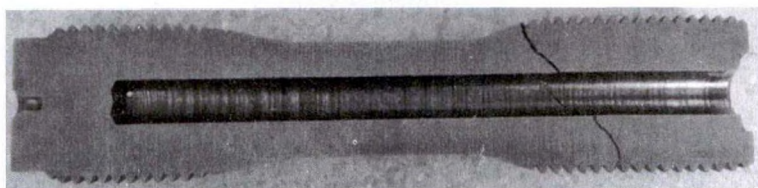


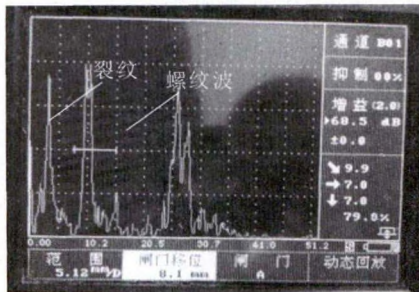
图10 伪缺陷检测图  
Fig.10 Pseudo defect detection diagram

到裂纹上形成裂纹单束波峰,幅值位 80%满屏。内检测探头离裂纹较远时的静态波形为图 11(c)所示,少部分检测声束入射到裂纹上形成幅值较低的单

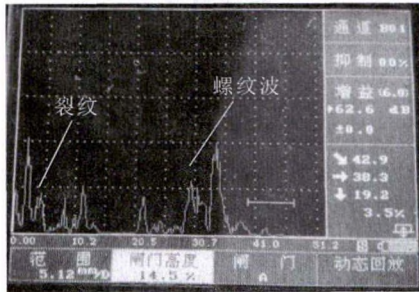
束波峰。根据图 11(b)、(c)可知,裂纹静态波形为单束状波峰,因裂纹的存在,阻挡了部分检测声束,导致螺纹波静态波形并非为“手”状,并且波峰之间间距



(a)螺栓自然裂纹



(b)裂纹静态波形1



(c)裂纹2静态波形

图 11 螺栓自然裂纹检测图

Fig.11 Bolt natural crack detection diagram

不相同。

## 4 总结

(1)根据 783 螺栓设计了专用试块和超声检测装置(检测探头 2.5 MHz $\times$ 6 mm45°、助探杆及探线),并可检出人工缺陷和自然裂纹。

(2)探头在螺栓杆部时,超声检测仪上无波峰出现;杆部人工缺陷为单束状波峰。

(3)探头在螺纹部位时,超声检测仪器上会出现“手”状波峰,各波峰幅值均不同,但波峰之间距离近似相同。

(4)探头在螺纹部位人工时,超声检测仪器上会出现幅值较小的单束状波峰,位于两螺纹波峰之间。

(5)探头在螺栓变径部位时,变径部位引起检测

声束发生波形变换产生伪缺陷,其静态波形为单束状波峰。

(6)探头在螺栓自然裂纹时,自然裂纹静态波形为单束状波峰,裂纹阻挡了部分检测声速,螺纹波规律破坏,且波峰之间间距不等距。

## 参考文献:

- [1] NB/T 47013.3-2015. 承压设备无损检测 第 3 部分:超声检测[S].
- [2] 张纪周,袁世丽,何顺开. 用纵波直探头测量新型耐热钢材料横波声速的方法[J]. 无损检测,2013(12):19-23.
- [3] 郑晖,林树青. 超声检测[M]. 第二版. 北京:中国劳动社会保障出版社,2008:20-24.
- [4] 编委会. 火力发电厂金属材料手册[M]. 北京:中国电力出版社,2000:253-274.

技术资料邮购

## 《铸件均衡凝固技术及应用实例》

本书由西安理工大学魏兵教授编著。共8章:1、铸铁件均衡凝固与有限补缩;2、铸铁件冒口补缩设计及应用;3、压边浇冒口系统;4、浇注系统大孔出流理论与设计;5、铸件均衡凝固工艺;6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺;7、浇注系统当冒口补缩设计方法;8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页。

特快专递邮购价:226元。

邮购咨询:李巧凤

电话/传真:029-83222071

技术咨询:13609155628