

Inconel 783 螺栓超声相控阵导波检测技术研究

Research on phased array guided waves testing technology on Inconel 783 bolts

王瑞璇, 丘国平, 刘宇哲

(上海明华电力科技有限公司, 上海 200090)

摘要: 螺栓是工业领域重要的连接件, 在电力行业, 螺栓在高温高压、振动等各种恶劣工况下服役, 受到拉应力的作用, 容易发生断裂, 导致严重的生产事故。因此, 必须探索一种有效可行的检测方案, 实现在役螺栓的检测。目前对螺栓裂纹检测较为常见的方法是常规超声检测, 其缺点主要有检测效率低、声波传播受侧壁反射干扰、缺陷不易识别等; 相控阵技术相对于常规超声, 具有电子控制聚焦和扫查、检测效率高、缺陷显示直观等优点。导波是一种适于杆状工件传播的弹性波, 传播距离远, 衰减相对更小, 在螺栓的裂纹检测中具有独特的优势。结合相控阵技术和导波技术开展研究, 计算了在 Inconel 783 螺栓中传播的导波的频散曲线, 分析了适用于 Inconel 783 螺栓检测的导波参数, 发现 $L(0, 1)$ 模态具有更高的速度, 适于表征缺陷; 以 5 MHz 的频率激发导波, 在传播过程中衰减较小, 可用于螺栓检测。针对 Inconel 783 螺栓, 研究了检测方法和工艺, 研制了一套适于 Inconel 783 螺栓的超声柱面导波相控阵检测主机和 64 阵元环型一维线阵相控阵探头, 并设计制作了两种不同尺寸的 Inconel 783 螺栓试块, 用于实施对比检测试验。在试块上进行的实际检测结果表明, 该超声相控阵导波检测系统能够成功检出螺栓内部的裂纹缺陷, 并且达到了较高的定位准确度和分辨力。

关键词: 相控阵超声; 导波; Inconel 783 螺栓; 检测工艺

Abstract: Bolts are important connection components in industry. In power plants, bolts serve under rough condition such as high temperature, high pressure, and severe vibration. Besides, they suffer from tensile stress, leading to the high possibility of crack failure and consequent serious accident. Thus, it's necessary to find out a testing method to realize the precaution of bolts' crack failure. So far, the most common testing method of bolts cracks is traditional Ultrasonic Testing. Compared to Phased Array Ultrasonic Testing, the former one shows disadvantages such as low inspecting efficiency, vulnerability of disturb of surface reflections, and difficulty in cracks' recognition, while the later one has merits like electronically controlled focus and scan, high efficiency, and convenience for flaws recognition. Guided Waves transfer well in bar-shaped components, with small attenuation, to a long distance. Thus, they are suitable for bolt cracks inspection. This article talks about the research on technology combining Phased Array Ultrasonic Testing and Guided Waves. The research team made the calculation of Frequency Dispersion Curve of Guided Waves transferring in Inconel 783 bolts, and analyzed the Guided Waves' parameters suitable for Inconel 783 bolts inspection. The results showed that modal $L(0, 1)$ possessed the highest velocity, which was ideal to represent the flaws reflection. And Guided Waves transmitted at the frequency of 5 MHz could be used in bolts inspection due to their small attenuation. The research team focused on the Inconel 783 bolts to design inspection procedure and parameters. A system suitable for Inconel 783 bolts inspection was developed consisting of a Phased Array Guided Waves host computer and a cylindrical linear probe with 64 elements. Related simulating testing blocks were also fabricated in two different sizes for comparative test. The results from the comparative test showed that the inspection system was capable of discovery of finding out the cracks inside the bolts, with high positioning accuracy and resolving ability.

Key words: phased array ultrasonic testing; guided waves; Inconel 783 bolts; inspection procedure

中图分类号: TM621.2

文献标识码: B

文章编号: 1674 - 8069(2021)05 - 029 - 07

0 引言

螺栓作为各种设备的连接件,是工业装备中的标准配件之一^[1-2]。在电力行业,螺栓在高温高压、振动等各种恶劣工况下服役,容易产生疲劳裂纹。裂纹扩展到一定程度,就可能导致螺栓脆性断裂,造成重大安全事故,严重威胁人员及机组安全^[1,22]。

目前常规的无损检测方法主要有五种:射线检测、渗透检测、超声检测、磁粉检测和涡流检测^[3]。其中射线检测对于裂纹的检测效果较差,而磁粉检测、渗透检测、涡流检测只能检测表面和近表面缺陷,对于内部裂纹无能为力;故相对而言,超声检测是一种更适用于螺栓裂纹的检测手段。通过理论和试验研究,探索一种有效可行的超声波检测方案,实现在役螺栓的检测,对机组安全生产具有重要意义。

Inconel 783合金是一种抗氧化且具有低热膨胀系数的超合金。随着超超临界技术的兴起与发展,该合金被用于制造超超临界组高温螺栓等主要部件。相比于其他低膨胀高温合金,该合金含有较高成分的Al,显著提高了合金的抗日氧化能力和强度,而Cr含量的减少,使之热膨胀系数进一步降低。Inconel 783螺栓为带有中心孔的柔性螺栓,其螺纹部与腰部结合处存在缩颈,这使得常规超声检测方法受到明显的杂波干扰。螺栓常规超声检测的主流方法是采用常规直探头与小角度纵波斜探头进行检测^[11],目前应用广泛,但其亦存在着不可忽视的劣势,主要体现在:

(1) 常规探头的检测效率较低;

(2) 螺栓多数几何形状为细长结构,超声纵波的侧壁干涉效应强烈,导致灵敏度下降。

(3) 虽然螺栓裂纹多数为走向简单的环向裂纹,但由于存在螺纹、腰部结构反射波,叠加纵波、横波的波形转换的干扰,缺陷的识别具有一定难度。

1 研究方法

1.1 超声相控阵导波检测原理

(1) 导波检测技术

超声波在介质中传播时,若介质中有两个或以上的界面存在,超声波将发生来回反射,这些往返的波将会产生复杂的波型转换,波与波之间还发生干涉^[4,10-11,20]。比较典型的导波介质包括圆柱壳、杆和层状的弹性体等^[5,18]。超声波在圆杆导波中的传

播具有多模态、频散的特性,通过求解频率方程可以得到导波各个模态的相速度和群速度^[6,12,21]。在同一频率下,会同时产生两个或以上的模态,并且各模态具有不同的群速度以及不同程度的频散,即群速度随着频率的变化而变化,波形混杂,难以用于检测缺陷^[6,13-15];但低频段的L(0,1)模态,速度最快,通常可以用作检测信号^[7,16,19-20]。

(2) 相控阵检测技术

相控阵技术来源于电磁波雷达技术^[17,23-25]。相控阵探头由多个独立工作的压电晶片按照一定的要求组成阵列,计算机对各个晶片的相位延时实现电子控制,使探头发射和接收可控方向、聚焦等参数的超声波束^[26-27],如图1所示。通过电子控制声束的位置和方向,就能实现多声束检测和电子扫查,提高了探头的扫查覆盖能力,降低了空间位置对机械扫查的局限^[2];多个方向的声束检测能提高超声波对不同方位裂纹的检测能力^[4,14]。

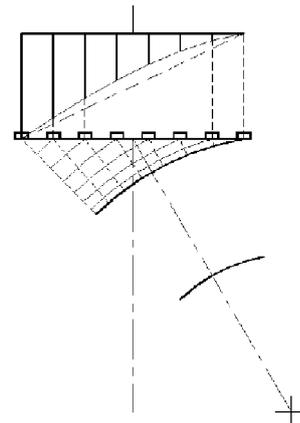


图1 相控阵合成声束示意

1.2 Inconel 783螺栓中超声柱面导波的传播

导波的一个最重要特征是各模态具有不同的特性^[8],同一模态在不同周期和不同频率下传播的特征也不同,这种特性与钢杆自身以及检测系统选取等有关。在空心圆柱状物体中传播的导波存在3种模态,即纵向轴对称模态(L模态)、扭转模态(T模态)和弯曲模态(F模态)^[9,12]。在螺栓导波检测中,分析最佳模态参数,可确定激发声波的最佳频率和最优周期,从而提高螺栓以及缺陷的检测质量^[11]。图2、图3为通过计算得到的置于空气中M72×330螺栓的超声柱面导波频散曲线。图4、图5为通过计算得到的置于空气中M90×385螺栓的超声柱面导波频散曲线。

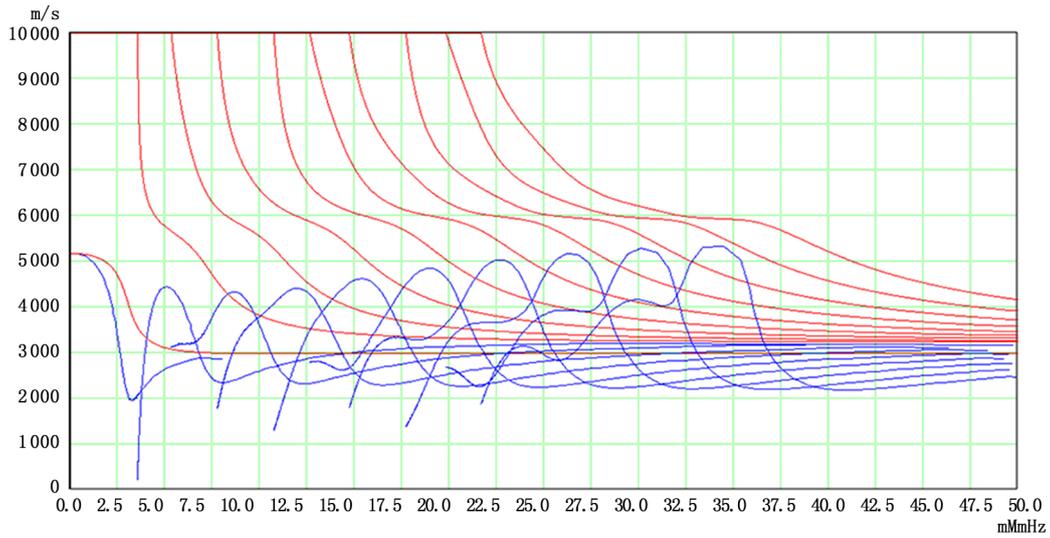


图 2 M72 螺栓超声柱面导波群速度频散曲线

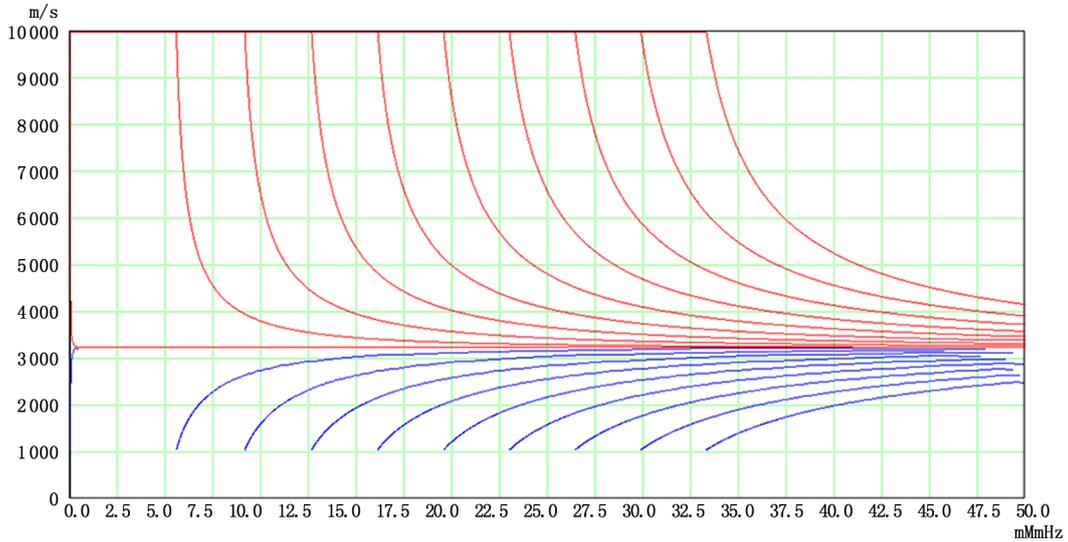


图 3 M72 螺栓超声柱面导波相速度频散曲线

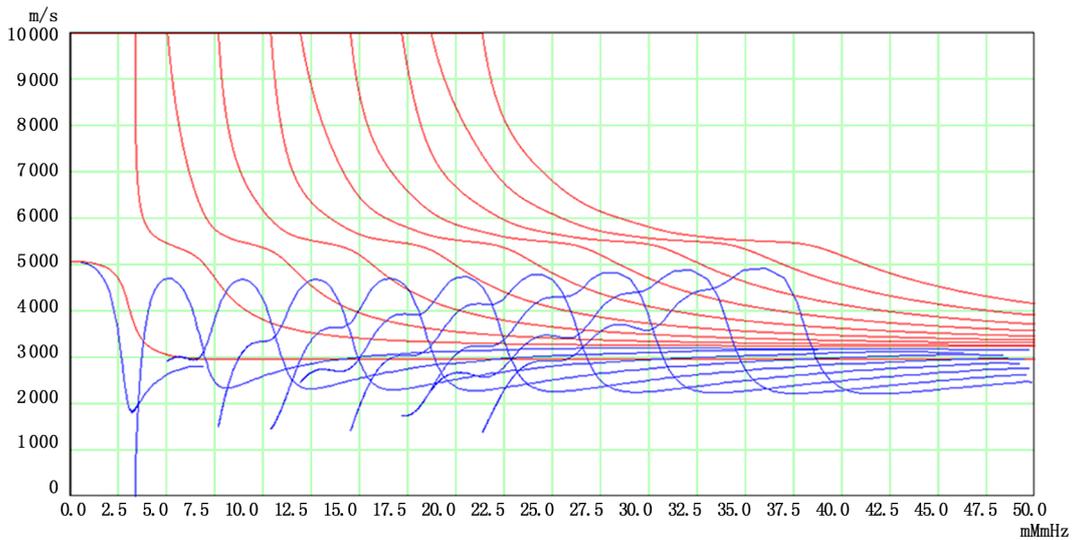


图 4 M90 螺栓超声柱面导波群速度频散曲线

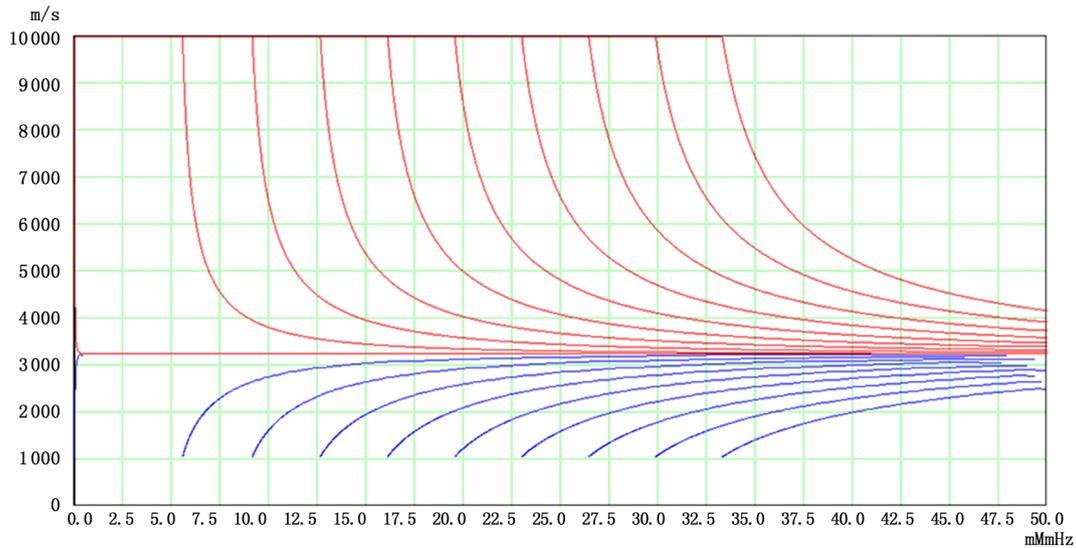


图 5 M90 螺栓超声柱面导波相速度频散曲线

从以上超声柱面导波相速度频散曲线可见 $0 \sim 5$ MHz 的范围内除 $L(0, X)$ 模态以外,其他的频散曲线均有截止频率,这就使得 $L(0, X)$ 模态具有更宽的频率范围、更强的独立性;图 6 中波 1 的成分为 $L(0, 1)$ 根据表 1 的声速计算结果,可见 $L(0, 1)$ 模态具有更高的速度,可以在回波分析中更加明显适用于螺栓裂纹检测;在 5 MHz 时导波轴向位移主要集中在杆内部,基本不受外部介质影响,图 7 为该状态下的波包形状(黄色部分),相比同一模态其他频率下的导波,衰减更小,可以传播更远的距离,故可以用来检测螺栓。

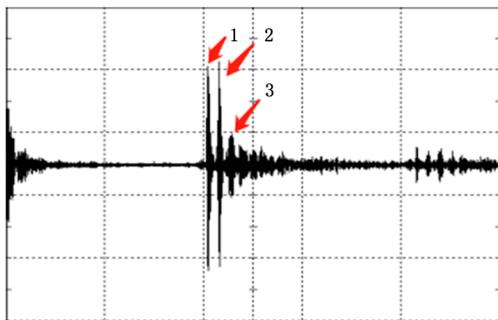


图 6 特定高频下的导波实测波包形状

表 1 波包中反射波波速

序号	波序号	波速/($m \cdot s^{-1}$)
1	波 1	5626
2	波 2	5620
3	波 3	5605

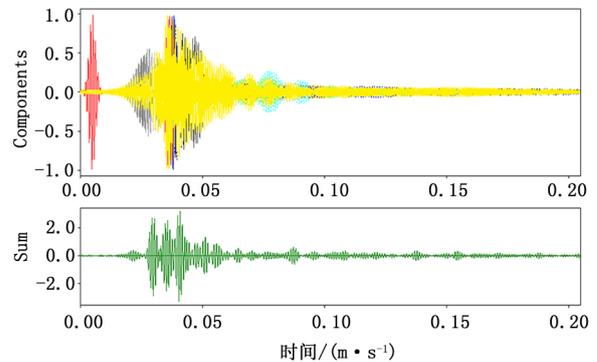


图 7 5 MHz 导波成分衰减对比

1.3 螺栓超声柱面导波相控阵检测系统开发

基于以上理论分析,项目组自主组装了一套超声导波螺栓无损检测系统(如图 8 所示)。包括:HSPA20 - Ae(Bolt) 16/64 阵元相控阵专用检测仪;高频 64 阵元环型一维线阵相控阵探头。

主机参数如下:

- (1) 具有 16:64 相控合成(激发阵元数:至少 64 个,接收阵元数:至少 16 个);
- (2) 全程动态聚焦;显示屏为 8.4 英寸 24 位真彩显示,分辨率 1024×768 ;数据存储:内部 32GB,外接 USB 可直接存储;
- (3) 供电方式: AC220 - DC15V 交流适配器, 11.1 V 锂电池;系统带宽: $0.5 \sim 15$ MHz(-3 dB);
- (4) 数字化频率: 100 MHz 8 bit; 扫描图像: A/C/S/L; S 扫线束: 256; 脉冲激发方式: 负方波,脉冲宽度为 $30 \sim 500$ ns(步进 10 ns); 发射电压为 $50 \sim$

100 V;

(5) 增益调节范围: 0 ~ 110 dB, 调节精度最小 0.1 dB。

探头参数如下: 阵元形式: 环形一维线阵; 阵元数量: 64 阵元; 探头频率: 依据频散曲线选择 2 ~ 10 MHz; 探头直径: 探头外径小于螺栓外径 2 ~ 5 mm。



图8 螺栓超声相控阵检测系统

1.4 Inconel 783 螺栓模拟试块的制备

本项目共制作了 5 个螺栓模拟试块。其中 1 个为完好螺栓, 未加工缺陷; 另外 4 个螺栓均在外壁分别加工了 2 处人工缺陷, 缺陷信息如表 2 所示。表 2 中的“缺陷深度”指缺陷与螺栓中心孔侧端面的最小距离。

表2 螺栓试块与缺陷信息

试块编号	试块尺寸/mm	缺陷编号	缺陷宽度/mm	缺陷高度/mm	缺陷长度/mm	缺陷深度/mm
1	M72 × 330	1-1	0.5	2	15	86
		1-2	0.5	2	15	172
2	M72 × 330	2-1	0.5	2	25	86
		2-2	0.5	2	20	172
3	M90 × 385	3-1	0.5	2	25	189
		3-2	0.5	2	20	300
4	M90 × 385	4-1	0.5	2	20	101
		4-2	0.5	2	20	212

1.5 螺栓缺陷的检测实验

首先在无缺陷螺栓试块上进行检测, 结果如图

9 所示。可见导波的传播特性使螺纹回波的干扰基本消失。但由于螺栓结构反射的原因, 腰部一直存在幅值不可忽略的固有回波显示, 对检测造成轻微的干扰。但是在转动探头的过程中, 结构的固有回波是不变的, 而缺陷波必定在探头的转动过程中同时移动, 以此方法可以分辨缺陷波。

再分别对每一个有缺陷螺栓试块进行检测, 记录检测到的缺陷信息。缺陷的信息包括位置、波幅、长度; 其中位置包括深度(与探头端面的距离)、周向位置(以晶片位置指示)。各缺陷的信息按照以下方法确定并记录:

(1) 轴向距离: 在声程数据栏(S)直接读数;

(2) 周向位置: 将闸门移动至缺陷处, 在环形探头示意图上会显示对应的晶片, 按照晶片序号(Cur)在实际探头上可以找到对应位置并记录;

(3) 波幅: 将闸门移动至缺陷最高波处, 从 A 扫信号中读取峰值波幅;

(4) 长度: 将闸门依次移动至缺陷两端的位置, 按照 6dB 法进行端点定位, 然后分别读取周向位置数据栏(L)数字, 相减即得缺陷长度。

2 结果与讨论

按照以上方法对螺栓试块的人工缺陷分别进行检测, 结果如下: 在对 1 号螺栓试块的检测中共发现了 2 处缺陷。

在检测过程中, 发现第 1 个缺陷的位置是距离端面(中心孔端) 87.3 mm 处, 波幅为增益 26 dB(A) 时满屏 87.8%, 如图 10 所示; 此时对应的是 37 号晶片, 在探头上找到对应位置, 可记录缺陷在螺栓的周向位置; 再测定右端点的位置 0.71 mm, 如图 11 所示; 再测定左端点的位置 -13.01 mm, 如图 12 所示, 则计算得到缺陷长度为 13.72 mm。

检测中发现第 2 个缺陷的位置是距离端面(中心孔端) 172.42 mm 处, 波幅为增益 26 dB(A) 时满屏 36.9%, 如图 13 所示。由于缺陷回波在结构回波中不明显, 因此转动探头, 再进行检测, 如图 14 所示, 回波明显, 波幅 24 dB(A) 80.8%。

对 2 号、3 号、4 号螺栓试块的检测步骤同 1 号试块, 不再赘述。检测出的缺陷信息汇总如表 3 所示。在本项目的螺栓超声柱面导波相控阵检测中, 深度误差最大为 1.86 mm(2%) 以内, 长度误差最大为 1.97 mm(9%) 达到了较高的准确度。

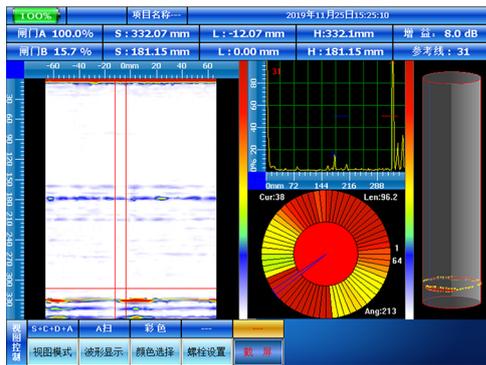


图9 底波与腰部结构回波

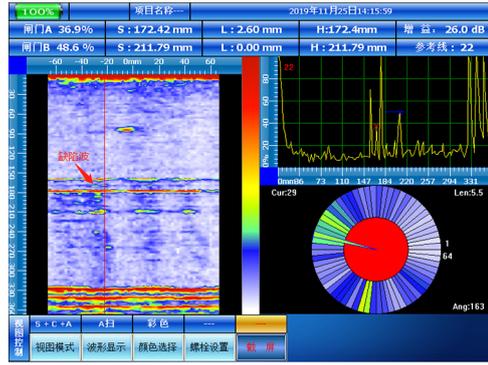


图13 缺陷1-2波形 转动探头前

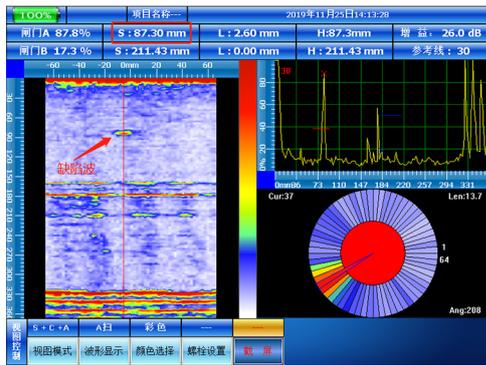


图10 缺陷1-1波形,最高波幅

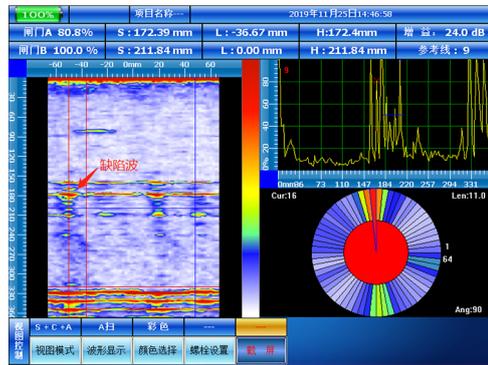


图14 缺陷1-2波形 转动探头后

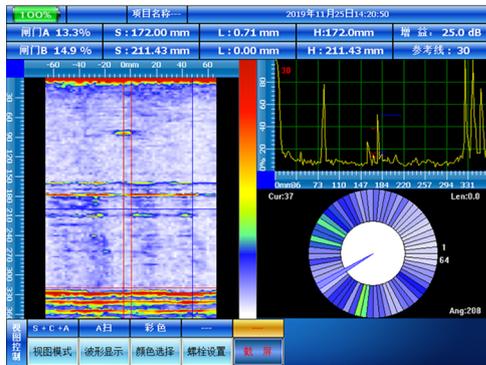


图11 缺陷1-1波形,右端点

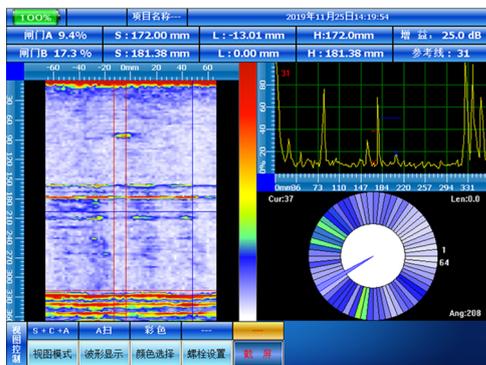


图12 缺陷1-1波形,左端点

表3 模拟试块上测得的缺陷信息与实际缺陷信息对比

编号	最大波幅	测得深度/mm	实际深度/mm	测得长度/mm	实际长度/mm
1-1	26dB, 87.8%	87.3	86	13.72	15
1-2	26 dB, 36.9%	172.42	172	14.2	15
2-1	28 dB, 46.3%	83.14	85	26.97	25
2-2	24 dB, 55.7%	171.53	172	19.4	20
3-1	28 dB, 83.1%	190.5	190	25.08	25
3-2	36 dB, 72.2%	298.84	300	17.98	20
4-1	30 dB, 51%	102.48	101	20.35	20
4-2	29 dB, 94.1%	212.88	212	20.35	20

3 结论

(1) 对螺栓中的超声柱面导波的频散曲线进行了分析,得出检测时采用5 MHz的L(0,1)模式的柱面导波模式能得到较好的检测效果。

(2) 研发了螺栓超声柱面导波相控阵检测系统,采用16/64阵元相控阵检测仪和5 MHz、64阵元环形一维线阵相控阵探头,满足现场检测的需要。

(3) 对螺栓中的人工缺陷进行了检测试验,检

测结果和缺陷真实信息吻合度较高,表明了超声柱面导波相控阵检测系统对于 Inconel 783 螺栓裂纹的检测具有实用价值。

参考文献:

- [1]张俊伟,王建军. 电站机组高温螺栓裂纹超声波探伤方法[J]. 内蒙古石油化工, 2020, 46(11): 43-46+111.
- [2]杨敬,吴斌,焦敬品,等. 各向异性焊缝缺陷超声阵列全聚焦成像方法[J]. 声学学报, 2019, 41(1): 125-135.
- [3]沈玉娣. 现代无损检测技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2012.
- [4]孙芳. 超声相控阵技术若干关键问题的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [5]Meeker T R, Meitzler A H. Guided wave propagation in elongated cylinders and plates [J]. Physical acoustics, 1964(1): 111-167.
- [6]Rose J L, Ditre J J, Pilarski A, et al. A guided wave inspection technique for nuclear system generator tubing [J]. NDT & E international, 1994, 27(6): 307-310.
- [7]Demma A, Cawley P, Lowe M, et al. The reflection of the fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 114(2): 611-625.
- [8]Zhuang W, Shan A H, Datta S K. Axisymmetric guided wave scattering by cracks in welded steel pipes [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1997, 119(4): 401-406.
- [9]Silk M G, Bainton K F. The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to Lamb waves [J]. Ultrasonics Symposium, 1979(1): 246-249.
- [10]Feng Sheng, Tu Jun, Wei Shilin, et al. Ultrasonic testing of axial stress of high strength bolts for bridges [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 64(1-4): 685-692.
- [11]Nondestructive Testing and Evaluation; New Nondestructive Testing and Evaluation Findings from Beijing Institute of Technology Described (A Shape Factor Based Ultrasonic Measurement Method for Determination of Bolt Preload) [J]. Technology News Focus, 2020.
- [12]Energy - Nuclear Power; Reports Outline Nuclear Power Findings from Shanghai University of Engineering Science (Design of Control System for On-line Ultrasonic Testing Device of Nuclear Power Hollow Flange Bolt Based on Labview) [J]. Computers, Networks & Communications, 2019: 98-102.
- [13]Jia Jinlong, Wang Caimei. Ultrasonic Method Research on Residual Tension Testing of Bolt with Assembling to Yield [J]. Mechanical Engineering and Technology, 2018, 7(4): 245-251.
- [14]Fukuda Makoto, Imano Kazuhiko. OS6-16 A Study of Relation between Scattering Parameter for Ultrasonic Waves and Axial Force in Bolt Conclusions (Measurement Techniques using Ultrasonics (1), OS6 Ultrasonic non-destructive testing and evaluation, Measurement Methods) [J]. The Abstracts of ATEM: International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics: Asian Conference on Experimental Mechanics 2015, 2015. 14.
- [15]Ren Liang Shan, Liang Tian, Wen Feng Zhao, et al. Research on Geostatic Stress and Optimization of Bolt Support for Tilted Strata Roadway [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(580-583): 1335-1341.
- [16]Chao Lu, Long Yu Xia, Ming Fang Zheng. 3-D Numerical Modeling of Ultrasonic Guided Wave Testing for Defect in Rock Bolt [J]. Advanced Materials Research, 2013(631-632): 794-800.
- [17]Hiroyuki Takenouchi, Masayoshi Enokizono, Izumi Tanikura, et al. Application of ultrasonic testing for fatigue crack detection of bolts [J]. Japan Society of Civil Engineers, 1989, 1989(404): 443-449.
- [18]E O Kahya. A useful guide for gravitational wave observers to test modified gravity models [J]. Physics Letters B, 2011, 701(3): 291-295.
- [19]Jin C X, Xin-Jun WU, Xia Z M, et al. Design and application of simulant signal generator used for Guide wave testing [J]. Manufacturing Automation, 2006, 28(10): 79-81.
- [20]Brown L W. Production testing of wave guides [J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part IIIA: Radiolocation, 1946, 93(1): 47-48.
- [21]J Hoffmann, M Wollensack, J Rufenacht, M Zeier. Extended S-parameters for imperfect test ports [J]. Metrologia, 2015, 52(1).
- [22]Duan Peng, Liu Zongde, Gu Shuchao, et al. Evolution in Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 783 Alloy Bolts after Long Term High-Temperature Aging at 700°C [J]. Metals, 2020, 10(11): 1440.
- [23]罗畅, 钱玉君, 刘俊建, 等. 超超临界机组中压调门 Inconel 783 合金螺栓断裂的原因 [J]. 机械工程材料, 2019, 43(10): 71-74+78.
- [24]Allam Ahmed, Sugino Christopher, Harding Matthew, et al. Phased Array Ultrasonic Testing of Inconel 625 Produced by Selective Laser Melting [J]. ASME J Nondestructive Evaluation, 2021: 1-12.
- [25]Morales Rafael, Ezcurdia Iigo, Irisarri Josu, et al. Generating Airborne Ultrasonic Amplitude Patterns Using an Open Hardware Phased Array [J]. Applied Sciences, 2021, 11(7): 2981.
- [26]Mozhayko A A, Manninen S A, Davydov V V, et al. Modeling of physical processes of interaction of ultrasonic wave with metal structures for detection of defects [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1745(1): 012046(799).
- [27]Zhang Ningning, Bian Wentong, Pan Binbin. The application of ultrasonic phased array technology in wind turbine blade defect detection system [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 675(1): 012077(799).

收稿日期: 2021-06-01; 修回日期: 2021-06-23

作者简介: 王瑞璇(1989-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 电力行业无损检测新技术研发与应用。E-mail: rooterw@163.com