DOI: 10.13382/j.jemi.B2407294

铸造不锈钢机匣 R 角区域的水浸超声相控阵检测技术*

黄鑫章[1,2] 陈振华[1] 李 喆[3] 王红源[4] 赵玉琦[1] 卢 超[1]

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063;2. 广东省特种设备检测研究院中山检测院 中山 528400;
3. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 沈阳 110043;4. 宁波市特种设备检验研究院 宁波 315048)

摘 要:大型燃气涡轮发动机不锈钢机匣结构中包含大量 R 角区域,该区域因壁厚较大且是曲面结构,制造过程中容易出现微裂纹、气孔、夹杂等缺陷。射线检测因受到 R 角曲面的形状限制而无法布置射线底片,并且大厚度 R 角区域也很难被射线穿透,造成射线检测灵敏度下降、缺陷出现漏检。由此,提出大型不锈钢机匣 R 角区域内部缺陷的超声水浸相控阵检测技术。将相控阵探头布置于机匣内环曲面,通过修正曲面聚焦法则控制阵元发射超声波在 R 角区域形成聚焦声场;通过建立数值仿真模型分析聚焦法则修正前后的声场聚焦性能,同时分析了水距对聚焦声场的影响;最后,基于修正的聚焦法则和优化的水距开展机匣 R 焦区区域的超声相控阵检测试验。结果表明:通过曲面聚焦法则修正和水距优化可在 R 角区域形成聚焦声场,该区域扇形扫描图像质量得到明显改善;能够显示 Φ1.5 mm 当量尺寸的横孔缺陷并具有良好的检测分辨率,-6 dB 法下定量相对误差低至 6.7%。

关键词:不锈钢机匣;R 角区域;超声水浸相控阵;聚焦法则;水距

中图分类号:TG115.28;TN95 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:430.25

Ultrasonic water immersion phased array detection technology in R angle area of cast stainless steel casing

Huang Xinzhang[1,2] Chen Zhenhua[1] Li Zhe[3] Wang Hongyuan[4] Zhao Yuqi[1] Lu Chao[1]

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Guangdong Special Equipment Testing Institute Zhongshan Testing Institute, Zhongshan 528400, China; 3. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co, LTD, Shenyang 110043, China; 4. Ningbo Special Equipment Inspection and Research Institute, Ningbo 315048, China)

Abstract: The stainless steel casing structure of large gas turbine engine contains a large number of R angle regions, which are prone to micro-cracks, pores, inclusions and other defects in the manufacturing process because of its large wall thickness and curved surface structure. Due to the shape limitation of the curved surface of the R angle, the radiographic film cannot be arranged, and the R angle area with large thickness is difficult to be penetrated by the ray, so that the sensitivity of the radiographic testing is reduced, and defects are missed. Therefore, the ultrasonic immersion phased array testing for the internal defects in the R corner region of the large stainless steel case is proposed. The phased array probe is arranged on the inner ring curved surface of the casing, and the array element is controlled to transmit ultrasonic waves to form a focused sound field in the R angle area by modifying the curved surface focusing rule. The numerical simulation model is established to analyze the focusing performance of the sound field before and after the modification of the focusing law, and the influence of the water distance on the focusing sound field is also analyzed. Based on the modified focusing rule and the optimized water distance, the ultrasonic phased array testing of the R focal region of the casing is carried out. The results show that a focused sound field can be formed in the R angle region by modifying the curved surface focusing rule and optimizing the water distance, and the image quality of the sector scanning in this region is significantly improved; the transverse hole defect with the

收稿日期: 2024-02-27 Received Date: 2024-02-27

*基金项目:江西省重点研发计划项目(20212BBE51006)、宁波市重大科技任务攻关项目(2022Z165)、国家科技重大专项项目(J2019-VII-0002-0142)资助

equivalent size of Φ 1. 5 mm can be displayed with good resolution, and the quantitative relative error is as low as 6. 7% by use of −6 dB quantitative method.

Keywords: stainless steel casing; R-corner area; ultrasonic water immersion phased array; focusing rule; water distance

0　引　言

机匣[1-4]是发动机的主要承力部件,其设计难度大、周期长,在整个发动机的设计中占较大比重,其使用稳定性直接关系到发动机的服役安全性与可靠性。机匣形状复杂,在吊耳及外环、支板两端等转接处都存在近 90°的 R 角区域[5]。受加工工艺与复杂机械载荷和极端工作环境影响,易产生微裂纹[6]、缩孔、夹杂等缺陷,对其服役寿命和安全性[7]造成极大危害。由于 R 区的外形是个小尺寸弧面,按照现行射线检验[8]工艺要求,R 角的胶片摆放和射线角度选择都很困难且穿透厚度过大,导致检测结果的可靠性[9-10]很差。常规超声同样很难覆盖整个 R 角区域,需要多次改变探头位置和旋转探头角度来保证入射声束对 R 区的有效覆盖。

超声相控阵检测技术[11-13]能够灵活地控制声束的偏转和聚焦,具有扫查速度快、声束可达性好、检测精度和缺陷分辨率高等优势。徐娜等[14]采用相控阵线阵换能器和弧形阵列换能器通过楔块耦合对 L 形工件的 R 角区域进行检测,在安装专用楔块后可使定量误差小于 0. 1 mm;但楔块需随 R 角区域几何形状的变化而变化,且安装楔块可导致检测灵敏度下降。Long 和 Cawley[15]采用局部水浸技术,设计了一种膜包覆式超声相控阵探头,虽然提高了检测能力,但膜的坚固性时常会出现一些问题。美国加州大学科研团队[16]研制出二维柔性超声相控阵贴片,虽解决了 R 角区域柔性声耦合的问题,但依然会降低聚焦性能,导致超声信号畸变和声能损失。张亚锋[17]针对曲面轮辋采用了水浸相控阵检测,确定将水层厚度设置为工件厚度的 1/4 ~ 1/3,但该试验未考虑到水层和工件表面曲率对聚焦法则的影响。综上,现有技术解决了 R 角区域无损检测的部分问题,局限性依然存在。

鉴于超声相控阵检测技术检测曲面时,工件表面难以耦合及平面聚焦法则失效的问题,提出了超声水浸相控阵检测技术的曲面聚焦法则修正方法,并对水距进行了优化。结果表明该方法可实现在曲面工件目标位置形成高性能聚焦声场,可用于不锈钢机匣 R 角区域内部缺陷的无损检测。

1　相控阵检测原理

超声相控阵探头由多个阵元有序排列,通过精确控制每个阵元的激发时间,使各阵元激发的超声波同时到达某一位置,而且相位一致,这样在该位置处所有阵元发射的超声波同相叠加,在该位置处回波幅值最高,声束宽度最窄,可以达到聚焦[18-19]的效果。

1.1　平面检测面的接触法聚焦法则

探头可通过直接接触法下与平面工件声耦合,如图 1 所示。设 N 个阵元发射声束聚焦于 $P(x_p, y_p)$ 点,第 i 号阵元到焦点的声程为 S_i、阵元距焦点最短声程为 $S_{\min}$,即:距 P 点最近的阵元应最后激发,而距离 P 点最远的阵元最先激发;设距离 P 点最远的阵元激励不加延时,则使各阵元激发声束同时(同相位)到达 P 点,只需控制第 i 个阵元在最后激发阵元前 Δt_i 时间激发:

$$\Delta t_i = \frac{S_i - S_{\min}}{C} = \frac{\sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2} - \sqrt{(x_n - x_p)^2 + (y_n - y_p)^2}}{C} \tag{1}$$

其中,C 为待检测材料纵波声速。

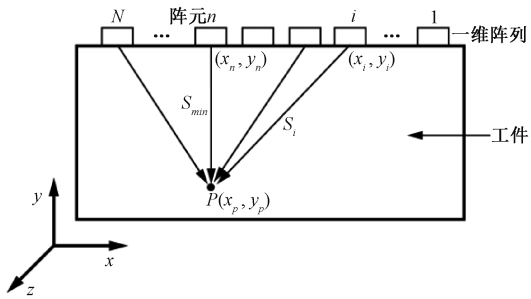


图 1　接触法聚焦法则计算原理

Fig. 1　The calculation principle of the contact method for focusing rules.

1.2　水浸法曲面聚焦法则

当检测面为曲面时,平探头无法通过直接接触的方法与工件耦合。声波在水平界面的入射角计算方式不再适用,此时,考虑界面曲率固定,声波入射角应为 θ_1,工件内声波折射角为 θ_2。如图 2 所示,以曲面圆心为坐标轴原点,根据被测工件与探头阵元几何尺寸及斯涅尔原理对平面聚焦法则进行修改,推导出适用于曲面检测面的聚焦法则。具体推导过程如下:

$$k_{nM} = \frac{y_n - y_M}{x_n - x_M} = \cot(\theta_1) \tag{2}$$

$$k_{MP} = \frac{y_P - y_M}{x_P - x_M} = \cot(\theta_2) \tag{3}$$

$$k_{法}=\frac{\sqrt{R^2-x^2}}{x}=\cot(\Delta\theta) \tag{4}$$

$$\theta_1=\arctan\left|\left(\frac{k_{法}-k_{nM}}{1+k_{法}\cdot k_{nM}}\right)\right| \tag{5}$$

$$\theta_2=\arctan\left|\left(\frac{k_{法}-k_{MP}}{1+k_{法}\cdot k_{MP}}\right)\right| \tag{6}$$

$$\begin{cases}\dfrac{C_1}{C_2}=\dfrac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)}\\ x_M^2+y_M^2=R^2\end{cases} \tag{7}$$

其中，R 为工件表面曲率半径、C_1 为水声速、C_2 为被测工件声速。

根据式(7)可得出折射点 M 的坐标(x_M,y_M)，进而推算出阵元 n 发射声波到达焦点 $p(x_p,y_p)$：

$$t_n=\frac{\sqrt{(x_n-x_M)^2+(y_n-y_M)^2}}{C_1}+\frac{\sqrt{(x_P-x_M)^2+(y_P-y_M)^2}}{C_2} \tag{8}$$

最后根据式(8)即可得出阵元 n 应提前最晚激发的阵元 Δt_n 时间激发：

$$\Delta t_n=t_n-t_{\min} \tag{9}$$

其中，t_n 为声束从阵元 n 传播至焦点的声传播时间，$t_{\min}$ 为声束从阵元传播至焦点的最短声传播时间。

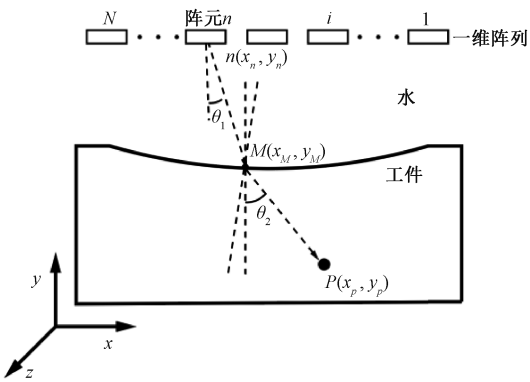


图 2 水浸法曲面聚焦法则计算原理

Fig. 2 The calculation principle of the water-immersion method's curved surface focusing rule

2 声场数值分析

2.1 模型建立

机匣铸件材料为马氏体不锈钢(ZG1CR17NI3)、纵波声速 5 820 m/s、弹性模量 200 GPa、密度 7 700 kg/m^3、泊松比 0.3。通过建立相控阵声场数值模型分析声场分布特征及其检测能力，采用弹性波物理场模拟超声波在模型中的传播特性。二维数值模型由阻尼层、阵元、匹配层、水层和工件组成，水层厚度设置为 1.2 mm，检测面曲率半径为 505 mm；如图 3 所示。阵元沿 x 方向排列并向 y 方向发射声波，采用三角形网格、网格尺寸不超过超声波波长的 1/6、时间步长设置为激励信号周期的 1/20。在检测面施加交变应力 $F(t)$ 模拟各阵元振动：

$$F(t)=A\left(1-\cos\left(\frac{2\pi ft}{n}\right)\right)\sin(2\pi ft) \tag{10}$$

其中，f 为频率、n 为周期数，因实际检测信号为两个周期的窄脉冲信号，即：$n=2$。

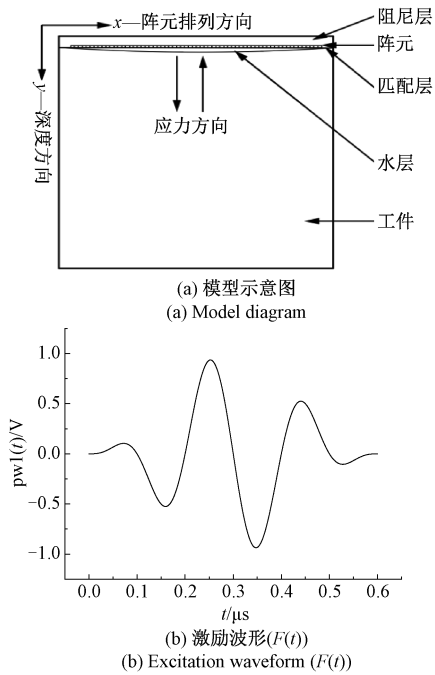


图 3 模型结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model structure

2.2 曲面聚焦法则的声场控制分析

分别模拟平面接触和曲面水耦合(水距 1.2 mm)两种声场分布，曲面曲率半径 505 mm，聚焦深度 50 mm。平面直接接触法和曲面水浸法各阵元激励延时(图 4)：曲面激励延时分布更为平坦，各阵元间的时差减小。

建立平面直接耦合和曲面水浸耦合聚焦的数值模型，模拟 3 种情况：平面直接接触——平面聚焦、曲面水浸接触——平面聚焦、曲面水浸接触——曲面聚焦，分析聚焦法则对聚焦效果的影响，如图 5 所示。声场仿真图显示：平面——平面聚焦、曲面——平面聚焦、曲面——曲面聚焦的声场聚焦深度分别为：49.6 mm、35.0 mm、49.6 mm；如采用平面聚焦法则无法实现曲检测面的指定深度聚焦，修正后的曲面聚焦法则能够实现水浸曲面聚焦。此外，由于曲面水层的存在，声波在水层中产生多次反射，导致在声场中形成了二次聚焦，如图 5(b)、(c)所示。

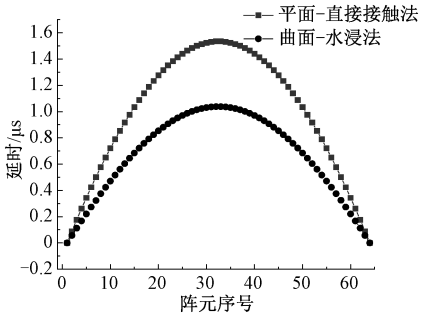


图 4　聚焦法则对比

Fig. 4　Comparison of focusing rule

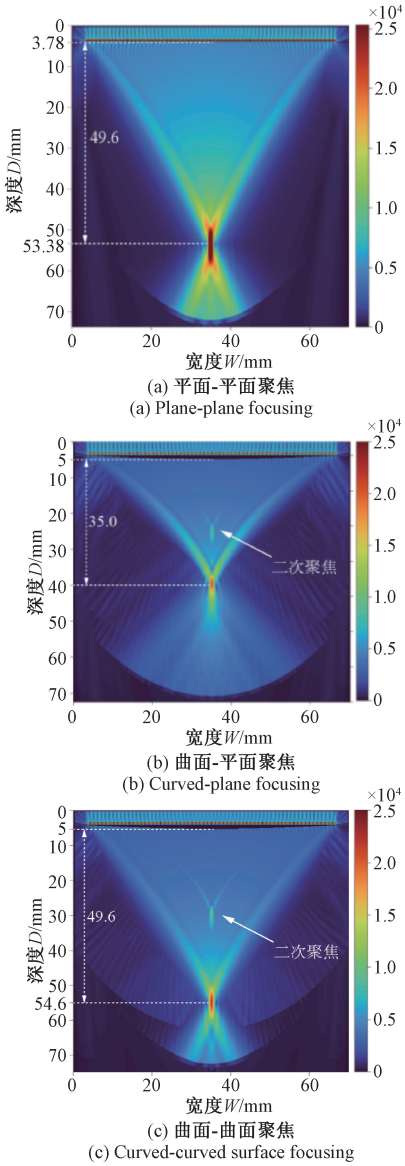


图 5　声场仿真

Fig. 5　Sound field simulation

从声场分布图中提取焦区轴向声压分布和横向声压分布，按-6 dB 法可测量焦区尺寸，如图 6 所示。由于曲面——平面聚焦未在指定深度聚焦，因此只讨论平面——平面聚焦、曲面——曲面聚焦两种情况，其焦区声压分别为：36 039.70 Pa、21 674.30 Pa；焦区高度分别为：9.96 mm、10.10 mm，焦区直径分别为 1.55 mm、1.37 mm。相对于平面聚焦，曲面聚焦声压下降 39.8%、焦区直径减小了 11.6%，说明曲面聚焦具有较小的检测灵敏度和较高的横向分辨率。

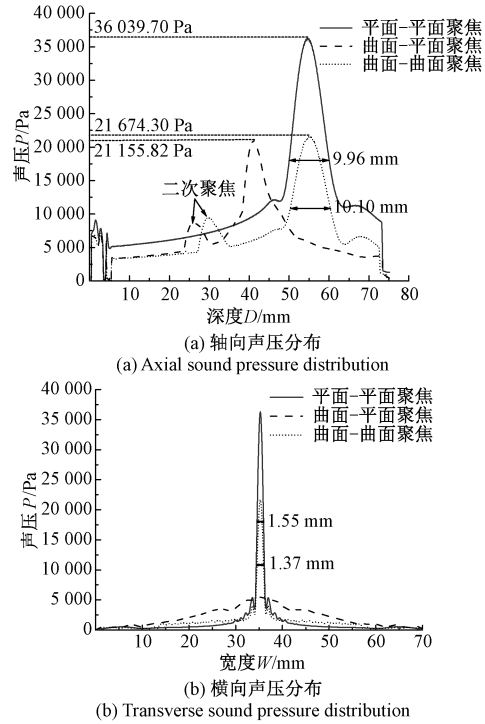


图 6　仿真声场对比

Fig. 6　Simulated sound field comparison

通过建立不同水层厚度的数值模型分析水层厚度对检测结果的影响，如图 7 所示。水层厚度分别设置为 1.2 mm 和 14 mm；水层厚度 14 mm 时水——曲面的二次界面回波在工件一次底面回波之后；两种情况的声场仿真图显示，1.2 mm 水距和 14 mm 水距在聚焦法则修正后的实际聚焦深度分别为 49.6 mm 和 48.8 mm，相差 1.6%；焦区幅值分别为 21 674.30 Pa 和 21 325.22 Pa，14 mm 水距减弱了 1.6%。根据-6 dB 法求出的焦区高度分别为 10.10 mm 和 10.12 mm，增大 0.2%；焦区宽度分别为 1.37 mm 和 1.46 mm，水距 14 mm 增大 6.6%。可见水距增大后，能够避免多次反射波的干扰，但同时对焦距、焦区幅度、焦区尺寸均有不利影响，将导致检测灵敏度和检测分辨率下降。

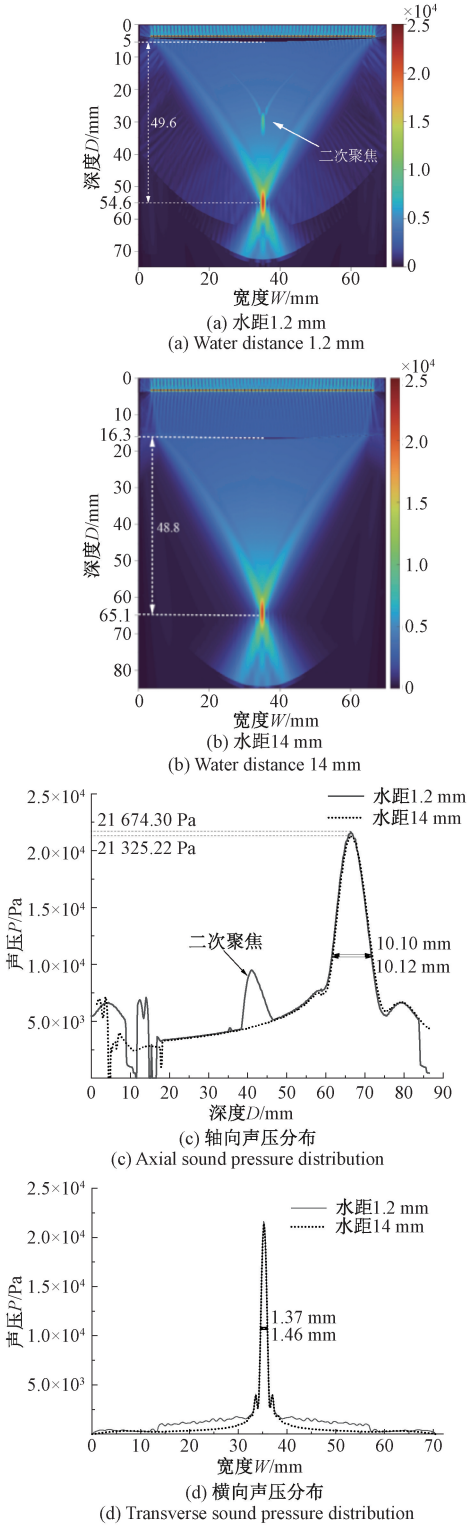


图 7 水距对曲面聚焦声场的影响

Fig. 7 Influence of water distance on sound field of curved surface focusing

3 检测试验与结果分析

3.1 试样制备及试验方法

从实际机匣构件上截取内环与支板转接处的 R 角对比试块，内环曲率半径为 505 mm，在 R 角区域加工 4 个长度 10 mm、直径 1.5 mm 的横孔，如图 8(a)所示。检测设备的发射/接收通道 64，发射电压 200 V、采样频率 100 MHz。采用易制造、易编程、成本低、通用性强[20-21]的一维线阵探头开展检测试验，线阵探头中心频率 5 MHz、阵元数 64、阵元间距 1 mm、阵元宽度 0.95 mm、阵元间隙 0.05 mm、阵元长度 10 mm。将试块与探头浸入水中，探头置于内环表面，水距为 h、调整探头方向使阵元沿内环轴向分布，发射超声波通过水层耦合进入试块中，如图 8(b)所示；激发电压调整至 50 V，扇扫偏转角 −30°~30°，步距角 0.2°。

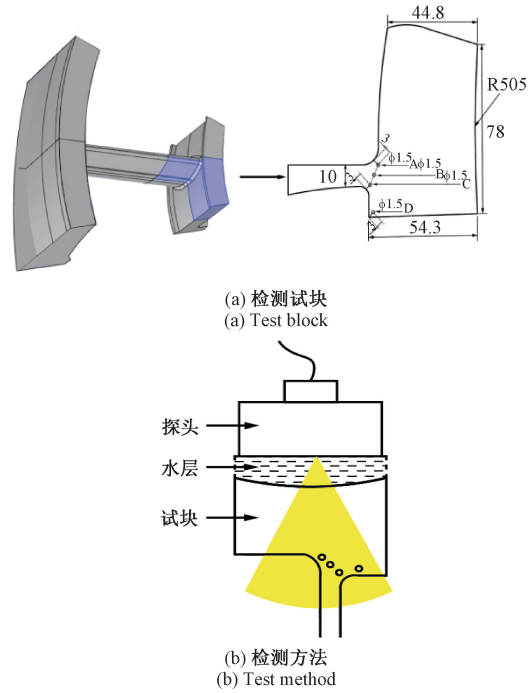


图 8 R 角试块示意图(mm)

Fig. 8 Schematic diagram of R angle test block (mm)

3.2 结果分析

1.2 mm 水距下试块无缺陷的 R 角区域扇扫图像，则在 50 mm 深度处显示 R 角结构的扇扫图像，如图 9 所示。

针对 1.2 mm 和 14 mm 水距分别使用平面和曲面聚焦法则对 R 角试块进行相控阵扇扫成像检测，其比对结

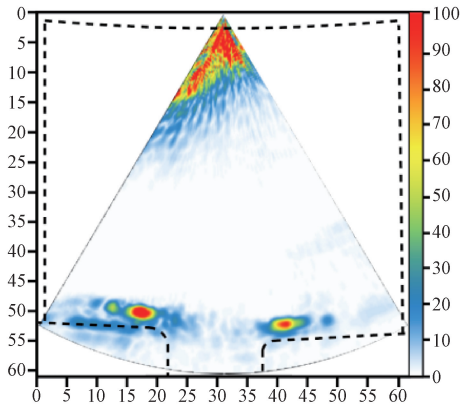


图 9　R 角试块无缺陷检测图

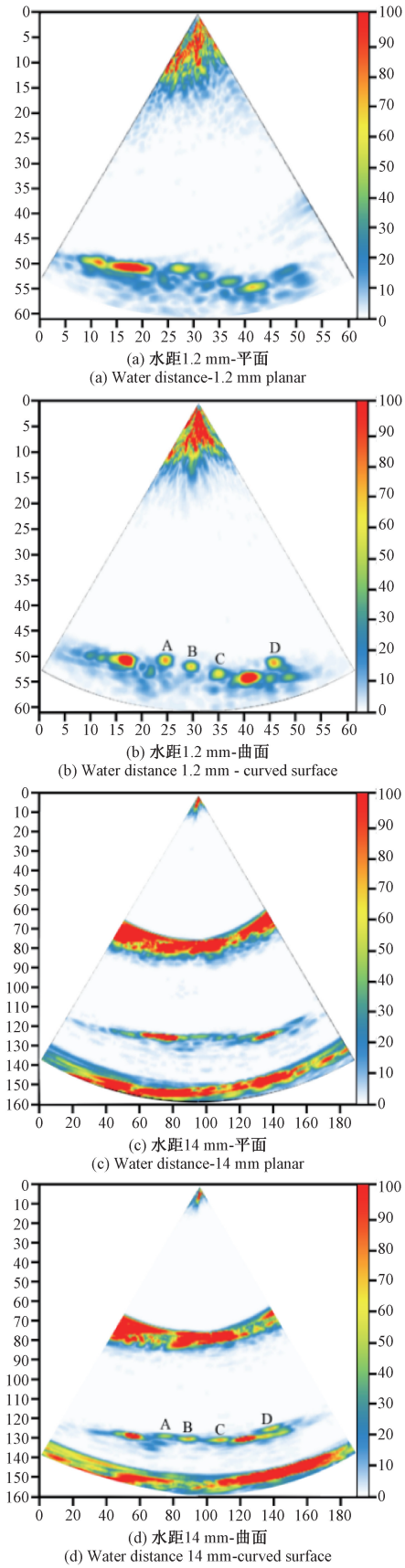
Fig. 9　Section image of the test block without defect

果如图 10 所示。由图可知,通过曲面法则聚焦的扇扫成像效果得到明显改善,特别是 1.2 mm 水距时的曲面聚焦扇扫图像能够显示清晰的横孔图像,并且在横孔 A 扇扫图像的左侧和横孔 C 扇扫图像的右侧显示 R 角结构的扇扫图像;而 14 mm 水距下的检测图像质量虽有所提高,但相比 1.2 mm 水距横向分辨率仍然较差;此外,1.2 mm 水距下试样检测范围内的噪声较低。检测结果与声场仿真结果一致,即:曲面聚焦法则能够很好的实现相控阵聚焦声场,水距提高后有利于降低水层多次反射的噪声干扰,但由于其焦区幅度下降、焦区尺寸增大导致其检测灵敏度和分辨率下降。

使用-6 dB 法对 1.2 mm 水距的检测图像中 4 个横孔缺陷进行定量检测,A/B/C/D 孔径测量值分别为 1.8 mm、1.6 mm、1.9 mm 和 2.1 mm,相对误差分别为 13.3%、6.7%、20.0% 和 40.0%。其中由于缺陷 D 的扇扫角度过大,导致聚焦性能下降严重,使得定量误差较大,且该缺陷不在 R 角区域内,可通过将探头向 D 缺陷方向移动降低扫查线角度以提高定量精度。

4　结　论

R 角区域水浸超声相控阵检测数值模型能够直观反映聚焦法则、水距对相控阵声场的影响,可用于指导曲面聚焦法则的修正和水距的优化;提出的曲面聚焦法则可用于计算各阵元的激发延时,能够有效的提高曲检测面中形成聚焦声场的能力;水层厚度设置为 1.2 mm 时,从内环曲面检测机匣 R 角时能够检测 Φ1.5 mm 横孔缺陷,并具有良好的检测灵敏度和分辨率,相对定量误差最小可达 6.7%;提出的水浸相控阵检测技术、聚焦法则及水距设置方法可有效的提高曲面构件的深度缺陷的声场聚焦能力,能够用于机匣 R 角区域的成像检测。



(a) 水距1.2 mm-平面
(a) Water distance-1.2 mm planar

(b) 水距1.2 mm-曲面
(b) Water distance 1.2 mm - curved surface

(c) 水距14 mm-平面
(c) Water distance-14 mm planar

(d) 水距14 mm-曲面
(d) Water distance 14 mm-curved surface

图 10　平面聚焦与曲面聚焦检测对比

Fig. 10　Comparison of testing image before and after delay correction

参考文献

[1] 冯国袖. 航空发动机机匣高效加工工艺研究与实践[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.
FENG G X. Research and practice on high-efficiency machining technology of aircraft engine casing [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.

[2] 高志坤, 迟庆新, 卜嘉利. 某涡轮后机匣裂纹失效机理分析[J]. 航空发动机, 2018, 44(6): 6-10.
GAO ZH K, CHI Q X, BU J L. Analysis of crack failure mechanism in a turbine TRF [J]. Aero Engines, 2018, 44(6): 6-10.

[3] 韩鹏江, 张国成. 高温合金机匣锻件改进研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2021, 56(4): 83-86.
HAN P J, ZHANG G CH. Research on forging improvement of superalloy casing [J]. Forging Equipment & Manufacturing Technology, 2021, 56(4): 83-86.

[4] 吴华. 航空发动机机匣基于自适应加工的无人干预技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2021, 57(3): 43-47.
WU H. Research on unmanned intervention technology of aircraft engine casing based on adaptive processing [J]. Aeronautical Precision Manufacturing Technology, 2021, 57(3): 43-47.

[5] 张冬梅, 于光, 周正干, 等. 复合材料构件 R 区的超声相控阵检测实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(5): 688-692.
ZHANG D M, YU G, ZHOU ZH G, et al. Ultrasonic phased array detection of R-zone composite components [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronsutics, 2013, 39(5): 688-692.

[6] 李艳明, 孟令琪, 佟文伟, 等. GH738 高温合金涡轮机匣开裂原因[J]. 机械工程材料, 2021, 45(7): 94-99, 110.
LI Y M, MENG L Q, TONG W W, et al. Causes of cracking of GH738 superalloy turbine casing [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(7): 94-99, 110.

[7] MAREK B, BOLIBRUCHOVA D, PASTIRCAK R, et al. Gating system design optimization for investment casting process [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(7): 3887-3893.

[8] 张钊骞, 王志明. 钛合金铸件射线检测难发现夹杂物缺陷分析与优化[J]. 铸造, 2021, 70(12): 1457-1460.
ZHANG ZH Q, WANG ZH M. Analysis and optimization of inclusion defects in titanium alloy castings difficult to be found by X-ray inspection [J]. Foundry, 2021, 70(12): 1457-1460.

[9] OLOFSSON J, BOGDANOFF T, TIRYAKIOĞLU M. On revealing hidden entrainment damage during in situ tensile testing of cast aluminum alloy components [J]. Materials Characterization, 2024, 208:113647.

[10] 刘为亮, 寇佐, 陆加见, 等. 燃气轮机发动机机匣铸造工艺设计及质量控制[J]. 大型铸锻件, 2018,(5): 1-3.
LIU W L, KOU Z, LU J J, et al. Casting process design and quality control of gas turbine engine casing [J]. Large Castings and Forgings, 2018,(5):1-3.

[11] 靳世久, 杨晓霞, 陈世利, 等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 925-934.
JIN SH J, YANG X X, CHEN SH L, et al. Development and application of ultrasonic phased array detection technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(9): 925-934.

[12] 江野, 王东, 秦小阳, 等. 奥氏体异种钢薄壁小径管焊缝裂纹超声相控阵检测[J]. 焊接学报, 2018, 39(8): 119-122.
JIANG Y, WANG D, QIN X Y, et al. Ultrasonic phased array detection of weld Crack of Austenitic dissimilar steel thin wall tube [J]. Acta Welding Sinica, 2018, 39(8): 119-122.

[13] 林莉, 杨平华, 张东辉, 等. 厚壁铸造奥氏体不锈钢管道焊缝超声相控阵检测技术概述[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 12-20.
LIN L, YANG P H, ZHANG D H, et al. Ultrasonic phased array detection technology for thick wall cast austenitic stainless steel pipeline welds [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 12-20.

[14] 徐娜, 周正干, 刘卫平, 等. L 型构件 R 区的超声相控阵检测方法[J]. 航空学报, 2013, 34(2): 419-425.
XU N, ZHOU ZH G, LIU W P, et al. Ultrasonic phased array detection method for R-region of L-shaped component [J]. Acta Aeronautica Sinica, 2013, 34(2): 419-425.

[15] LONG R, CAWLEY P. Further development of a conformable phased array device for inspection over irregular surfaces [C]. AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2008, 975(1): 754-761.

[16] HU H, ZHU X, WANG C, et al. Stretchable ultrasonic transducer arrays for three-dimensional imaging on complex surfaces[J]. Science Advances, 2018, 4(3):

eaar3979.

[17] 张亚峰. 轮辋水浸超声相控阵探伤中水浸层厚度设置探讨[J]. 铁道技术监督, 2016, 44(5): 21-23.
ZHANG Y F. Discussion on thickness setting of submerged layer in ultrasonic phased array testing of rim water penetration [J]. Railway Technical Supervision, 2016, 44(5): 21-23.

[18] LEI T C, DONG L X. Ultrasonic phased array length measurement of internal detects in butt weld [C]. International Conference on Mechatronics & Machine Vision in Practice(MIVIP). IEEE, 2016: 1-7.

[19] 代兴亮, 丁志鹏, 佟梦龙. 高温集箱三通接口焊缝的超声相控阵检测[J]. 焊接技术, 2020, 49(S1): 40-43.
DAI X L, DING ZH P, TONG M L. Ultrasonic phased array detection of Tee Joint Welds in High temperature header [J]. Welding Technology, 2020, 49(S1): 40-43.

[20] 施义茂, 张建寰, 陈仲怀. 超声相控阵探头声场优化设计仿真[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2013, 52(3): 370-375.
SHI Y M, ZHANG J H, CHEN ZH H. Ultrasonic phased array probe sound field optimization design simulation [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science Edition), 2013, 52(3): 370-375.

[21] 陈振华, 许倩, 王婵. 相控阵自定义聚焦的有限元模拟及其应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(12): 142-148.
CHEN ZH H, XU Q, WANG CH. Finite element simulation of phased array custom focusing and its application [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(12): 142-148.

作者简介

黄鑫章,2021 年于南京邮电大学通达学院获得学士学位,现为南昌航空大学硕士研究生,主要研究方向为超声检测及超声相控阵检测技术。
E-mail: 1939037371@qq.com

Huang Xinzhang received his B. Sc. degree from Tongda College, Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2021. Now he is a M. Sc. candidate of Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic detection and ultrasonic phased array detection technology.

陈振华(通信作者),2004 年于江西师范大学获得学士学位,2010 年于北京工业大学获得博士学位,现为南昌航空大学教授,主要研究方向为超声波无损检测技术及其系统、测控技术及仪器。
E-mail: zhenhuachen@yeah.net

Chen Zhenhua(Corresponding author) received B. Sc. From Jiangxi Normal University in 2004, Ph. D. from Beijing University of Technology in 2010, respectively. Now he is a professor in Nanchang Hangkong University. His main research interest includes ultrasonic nondestructive testing and related instrument, the measurement and control technology and instrument.