

基于散射信息的铸件不同角度裂纹缺陷全聚焦成像研究

刘尚瑀¹, 朱 智¹, 侯岑明², 侯春雨¹, 李兴捷¹, 刘 洋¹

(1. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110022;

2. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁沈阳 110000)

摘要: 裂纹缺陷严重影响铸件质量, 因铸件服役过程中受力角度不同, 不同角度裂纹对其质量影响的程度有所不同, 因此需要对裂纹角度进行判断。本文选用仿真结合试验的方式, 采用相控阵超声检测手段对不同角度裂纹进行成像分析。首先通过有限元仿真对缺陷散射信息进行提取, 建立裂纹角度与散射角度之间的关系, 最终通过全数据采集及全聚焦成像对裂纹角度进行判断。结果表明, 在裂纹角度较小时, 试验结果与仿真结果一致, 裂纹角度较大时可通过本文建立的角度对应关系进行判断。

关键词: 铸件缺陷; 相控阵超声; 全聚焦成像

作者简介:

刘尚瑀(1997-), 男, 硕士, 主要研究方向为铸件相控阵超声检测。E-mail: 15642839193@163.com

通讯作者:

李兴捷, 男, 研究员, 硕士生导师。电话: 13704016509, E-mail: lixj@chinasrif.com

中图分类号: TG247

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)12-1591-06

基金项目:

中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司技术发展基金(200221ZS01)。

收稿日期:

2023-08-16 收到初稿,
2023-09-19 收到修订稿。

铸造作为制造业的基础产业应用十分广泛, 随着技术的发展, 结构更为复杂、工作环境要求更为严苛的铸件成为了研发的重点。如航空发动机中的机匣、水轮机转轮等, 铸造过程复杂, 铸造成形过程中, 由于应力集中等问题, 不可避免会产生缺陷, 影响铸件质量, 进而降低铸件的服役寿命^[1]。其中, 裂纹是铸件疲劳失效的主要原因, 服役寿命与裂纹的方向和铸件服役时受力方向之间的夹角密切相关。因此, 确定铸件中裂纹的方向至关重要。

在无损伤检测领域, 射线检测和超声检测常被应用在铸件内部缺陷的检测^[2-3]。其中射线检测是依据材料与缺陷密度不同进而得到灰度不同的投影图像, 能够有效地检出裂纹缺陷, 但因其投影方向单一, 难以对裂纹方向进行确定。超声检测中, 裂纹缺陷被认为是金属中存在的界面, 无法传递表面张力, 当在金属表面射入超声波后, 超声波在金属内部传递遇到裂纹时, 裂纹面会对超声波产生散射, 形成散射场。散射场体现了超声波与缺陷的交互作用, 可以从中提取有关裂纹缺陷的信息, 如位置、方向、长度等^[4]。相关人员利用一些近似的方法模拟超声波与散射体(各种缺陷)的交互作用, 如槽型裂纹、圆孔等^[5]。但上述研究均是结合传统的单晶片探头, 从少数几个入射角和反射角的信号来描述缺陷特征, 可用信息较少, 缺陷分析相对不够完善。

相控阵超声单个探头中包括多组晶片, 均可用来单独发射、接收超声波, 同时可以实现对特定位置的声束聚焦, 得到幅值更高的散射信息。Zhang J等人从相控阵超声中的散射场来表征缺陷的特征^[6]。在相控阵超声中, 可以通过对多组晶片信号的后处理可以实现对检测区域进行成像, 目前常用的算法为全聚焦成像算法(TFM), 该方法的原始数据为所有晶片单独发射并单独接收的全矩阵数据(FMC), 通过幅值叠加实现对目标区域所有位置的聚焦。Zhang J等人也提出将散射信息引入全聚焦算法以提高分辨率的思想, 进一步提高了对缺陷的识别^[7]。但目前仍没有针对铸件中的裂纹缺陷进行超声波的模拟仿真以提取散射信息。

本文首先通过有限元仿真的方式建立铸件中不同角度裂纹与相控阵探头的交互作用, 提取散射信息, 得到可以描述缺陷散射信号的散射振幅分布图, 并分析特

征, 结合全聚焦成像算法对试块中不同方向模拟裂纹缺陷进行分析, 确定裂纹方向。可以有效改善铸件裂纹缺陷的检测效果, 提升铸件质量。

1 有限元模拟

1.1 有限元建模

ABAQUS在求解非线性问题时具有更好的优势, 因此本文选用ABAQUS对相控阵超声与裂纹缺陷的交互作用进行分析。如图1所示, 选用二维平面进行建模, 虽然二维模型代表缺陷在第三维是无限大的, 但不影响在铸件中不同方向裂纹与超声波在探头平面的交互作用, 在实际检测中, 全聚焦成像也是针对某一截面进行成像, 通过对探头的移动实现整个铸件的扫描, 因此本文所用方法也可以扩展到三维。本文选用32晶片探头进行模拟, 即 $n=32$ 。相控阵超声设备通过压电晶片激励产生超声波, 在仿真过程中, 通过对晶片区域施加表面载荷产生超声波。裂纹缺陷以长轴与短轴之比大于3的椭圆进行建模, 通过改变与探测面角度模拟各种角度的裂纹缺陷。

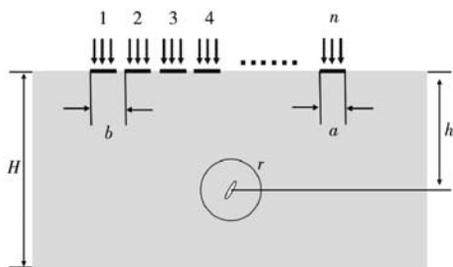


图1 有限元建模示意图

Fig. 1 Schematic diagram of finite element modeling

1.2 模拟参数设置

如图1所示, 本文选取相控阵探头晶片数 n 为32进行模拟, 晶片尺寸 a 为0.5 mm, 晶片间距 b 为0.6 mm。每个晶片根据延时法则设置相应的激励信号触发时间。首先设置超声波激励信号, 在GB/T 7233.1—2009中规定, 铸件检测时探头频率选择在1~5 MHz。本文为验证较小缺陷的模拟结果, 应使超声波波长尽可能小, 因此选用5 MHz进行仿真。同时保证超声信号频带更窄, 具有更好的指向性, 采用汉宁窗调制的正弦波进行模拟。图2为超声波激励信号(表面载荷幅值曲线), 信号如下:

$$x(t) = A(1 - \cos(2\pi ft/n)) \cdot \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

式中: A 为幅值, 取0.5; f 为频率, 取5 MHz; n 为周期数, 取5; t 为时间。

超声波在试块中遇到缺陷后会发生模式转换, 在纵波检测中存在L-S、L-L两种转换, 其中L代表纵波, S代表横波。如图1所示, 在铸件检测中, 多用纵波进行探伤, 仿真时为了获得单一的模式信息, 需要对模

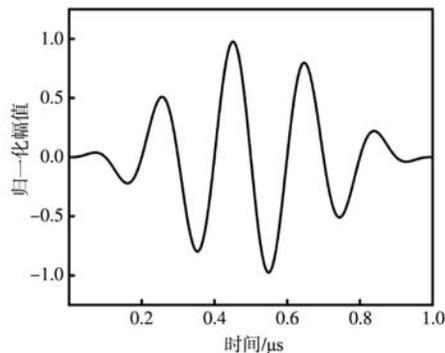


图2 超声波激励信号

Fig. 2 Ultrasonic excitation signal

拟区域(H 为模拟区域宽度)、缺陷位置(h 为缺陷中心距探测面垂直距离)以及接收信号的位置(检测圆半径 r)进行设计, 利用纵波与横波声速的不同, 在接收位置只接收纵波的散射信息。缺陷外圆形即为观测位置, 本文通过在观测圆上半部分等距设置20个接收点提取裂纹缺陷的散射信息。根据铸件中纵波声速和横波声速设置模拟区域 H 为80 mm, h 为60 mm, r 为12 mm。

确定模拟区域后对网格进行划分, 网格的大小对仿真结果会产生较大的影响。粗大的网格会导致声场分布不均匀, 影响仿真精度; 较小的网格会增加仿真时间。需要根据超声波波长确定网格尺寸, 一般要求网格 x 、 y 两个方向最大值小于波长的八分之一, 本文取0.1 mm。在声场与缺陷作用的仿真过程中, 另一个需要注意的问题是边界反射。超声波在遇到缺陷后会发生发射, 模拟区域边界同时也会发生反射, 边界反射信号与缺陷散射信号同时存在, 难以提取缺陷的纯散射信息。因此需要对边界进行处理以吸收超声波。目前, 常用吸收边界法与无限边界法对边界进行处理。本文采用无限边界法, 选取边界的网格类型为CINPS4无限单元, 设置向外的扫掠方向。超声波在遇到边界后振动消失, 模拟区域内只存在超声原始信号和缺陷的散射信号。仿真中时间步长的选择与网格尺寸有关, 一般单位步长内超声波传播的距离不超过网格的最长边, 本文选取步长为 10^{-9} s。

设置好模拟参数后, 需要在模拟区域添加裂纹缺陷, 在预定位置设置椭圆形裂纹。椭圆长轴为2 mm, 短轴为0.2 mm, 平行于探头晶片阵列方向为 0° 裂纹, 分别设置 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 五种角度。裂纹边界网格划分更为密集, 可以更加准确的计算缺陷的散射信息。本文所用模拟参数如表1所示。

2 仿真结果

2.1 超声波与裂纹缺陷相互作用

如图3为超声波分别与 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 裂

表1 有限元仿真参数
Table 1 Simulation parameters of finite element

材料	弹性模量/MPa	密度/(t·mm ⁻³)	泊松比	网格类型	模拟区域/mm	时间步长/s	检测圆半径/mm
铸钢	2×10^5	7.8×10^9	0.3	CPE4R (模拟区域内部) CINPS4 (模拟区域边界)	80 × 50	10^{-9}	12

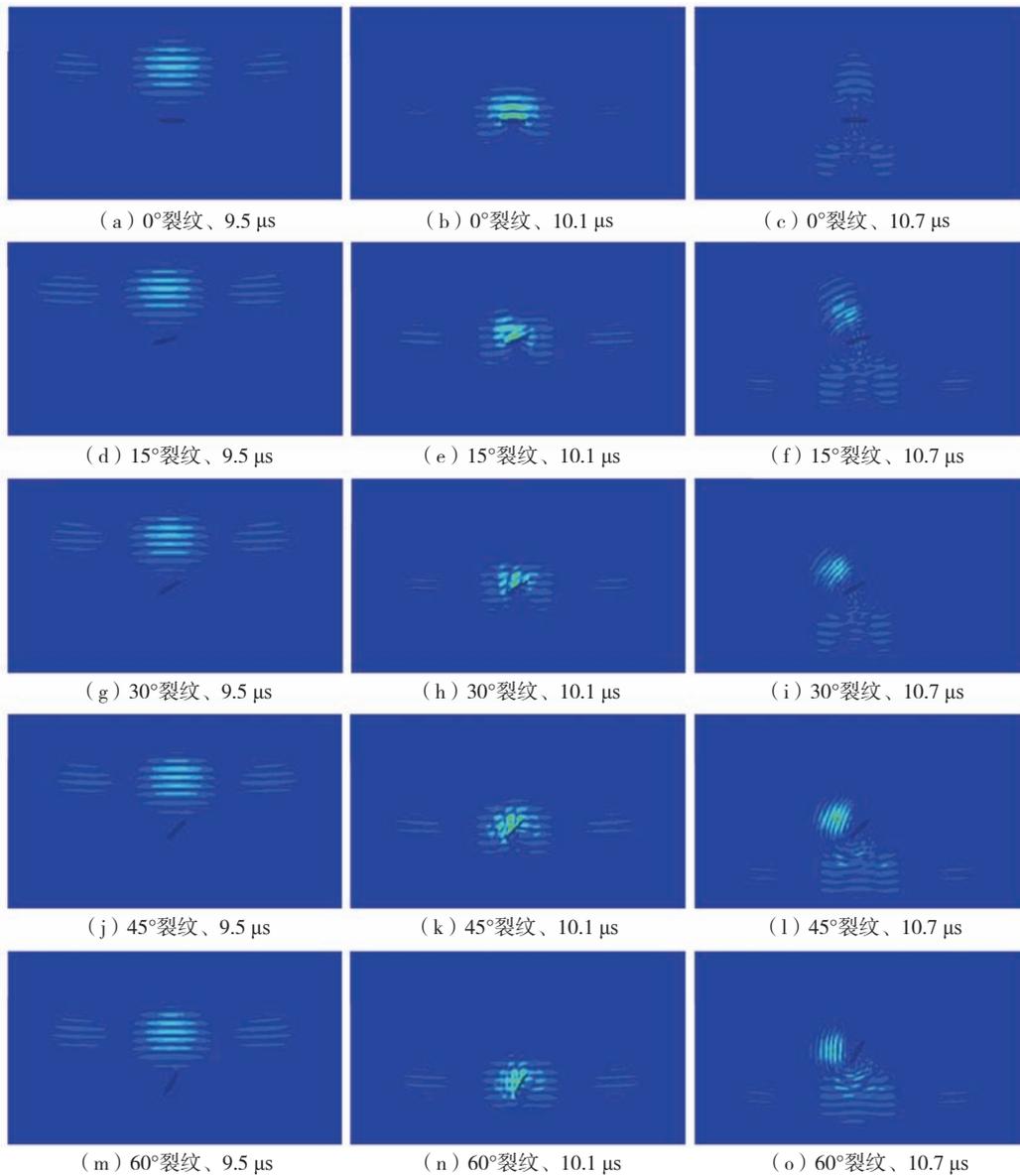


图3 超声波与不同角度裂纹交互过程

Fig. 3 Ultrasound interaction process with cracks at different angles

纹的相互作用过程。对每种角度裂纹分别取超声波发射后9.5 μs、10.1 μs、10.7 μs三个时间点进行观察。图3a-c为裂纹长轴方向与超声波入射方向成90°时(裂纹角度定义为0°),经过延时法则控制聚焦后的超声波与0°裂纹缺陷作用后的过程。由图3b可知,超声波在遇到裂纹缺陷长轴时,部分声波沿裂纹长轴垂直方向散射回原路线,此时裂纹缺陷上部为入射声场与散射声场叠加能量更大,因此云图颜色更深。在超声波经过

裂纹缺陷后,裂纹两侧声波没有受到影响,继续沿原路线传播。声波遇到障碍物后会进行衍射,在裂纹下方也有声波继续传递。如图3c所示,随着声波继续传播,裂纹上部的声波即为缺陷的散射信号,其中携带着缺陷的尺寸、形状信息,本文引入散射幅值系数对其进行定量表征。

图3e、h、k、n分别为不同角度裂纹在同一时刻与超声波的作用云图,其中颜色较深部分即为缺陷的散

射声波所在位置，可以发现不同角度裂纹的散射声波其散射角度具有明显差异。随着裂纹角度的增加，散射角度也在增加，因此可以提取散射幅值最大时的角度，以此推断裂纹的角度。由图3f、i、l、o可以看出，在超声波遇到裂纹缺陷后继续传播，随着裂纹角度的增加，裂纹下方的声波逐渐增加，但其传播方向没有受到影响，因此本文选择裂纹上方180°的区域进行散射幅值的提取，裂纹下方并不考虑。

2.2 裂纹缺陷散射信息

为了定量描述裂纹缺陷的角度，在裂纹缺陷上部等距设置20个观测点（图4）。仿真过程中施加的位移载荷是通过质点（网格）的振动传递形成声波。因此在后处理模块中，可以提取质点（网格）的位移参数作为散射幅值。

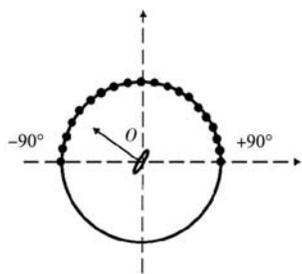


图4 观测点分布
Fig. 4 Distribution of observation points

但直接提取的幅值信息包括正负相位，需要得到该曲线的包络信息，因此再将其进行Hilbert变换。如图5所示，黑色曲线为原始散射幅值，红色曲线为变换后的包络曲线，最终取该曲线上的峰值作为各观测点（散射角度）的散射幅值，对所有角度幅值进行归一化处理以对比不同角度裂纹的散射角度。

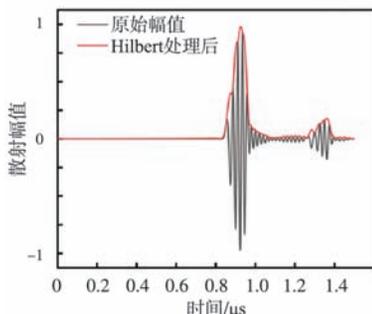


图5 散射信号处理
Fig. 5 Scattered signal processing

图6分别为0°、15°、30°、45°、60°时裂纹缺陷的归一化散射系数。可以发现，在裂纹0°时，散射幅值最大时的角度也为0°，说明散射信号完全垂直散射回原线路。但裂纹在15°时，散射信号并非垂直于裂纹长

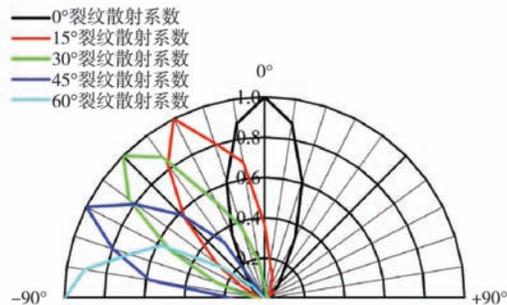


图6 散射系数
Fig. 6 Scattering coefficient

轴方向散射，而是以更大的角度发生散射。表2统计了不同裂纹角度所对应的散射角度，观测点密集程度影响着散射角度的统计偏差，本文共选择20个观测点，角度误差为±4.5°。在裂纹60°时，散射角度已经接近90°，接近完全垂直于超声入射方向，难以被探头重新接收。因此本文也只选取裂纹在60°以内进行讨论。根据仿真结果，可以发现裂纹角度与散射角度之间存在一定的关系，本文探讨了0~60°时两者的对应关系，在实际检测中可以通过对缺陷散射系数的提取判断裂纹角度，实现对铸件质量的控制。

表2 不同裂纹角度对应的散射角度
Table 2 Scattering angles corresponding to different crack angles

裂纹角度/°	散射幅值最大时的角度/±4.5°
0	0
15	27
30	45
45	63
60	90

3 试验验证

本文选用多浦乐Novascan32/128PR设备，探头选取与仿真时一致，晶片数为32，晶片间距0.6 mm。本设备具有全聚焦（TFM）模块，该种算法成像原理如图7所示。探头上共有n个晶片（ $X_1, X_2 \dots X_n$ ），在 X_1 晶

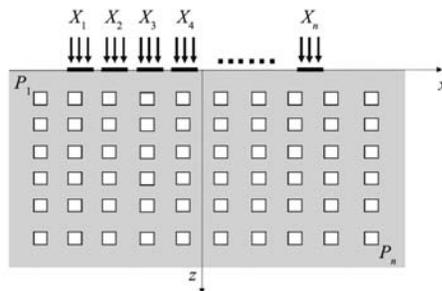


图7 全聚焦算法示意图
Fig. 7 Schematic diagram of the total focus method

片激发超声波时，所有晶片接收超声波，结束后 x_2 再激发超声波，所有晶片接收，依次重复上述过程。最终得到 $n \times n$ 条数据（全矩阵数据）。

全聚焦成像就是在全矩阵数据的基础上，对选定的成像区域进行布点，即选择像素点 P 。根据每一个像素点与各个晶片的相对位置，对该点的幅值进行累加计算，实现对每一个像素点的聚焦。以 $P(x, z)$ 点为例，其幅值计算如下：

$$A_p = \sum_{n=1}^N \sum_{n=j}^N E_{x_i}, E_{x_j}(T_p) \quad (2)$$

式中： T_p 为 i 晶片发射超声波传到 P 点，再返回 j 晶片的时间， E 为幅值，即全矩阵数据中相对应的数值。 T_p 计算公式如下：

$$T_p = \frac{\sqrt{(x_p - x_i)^2 + z_p^2} + \sqrt{(x_p - x_j)^2 + z_p^2}}{V} \quad (3)$$

式中： x_p 和 z_p 为 P 点的横坐标与纵坐标（探头中心为原点）， x_i 为发射晶片的横坐标， x_j 为接收晶片的横坐标， V 为试块的声速。根据该式可在全矩阵数据中得到每一个 P 点对应的幅值，再用式（2）进行叠加，得到 P 点最终的幅值。该幅值数据用于模拟区域的成像。本文采用此算法对不同角度裂纹的缺陷所在位置进行成像，在幅值数据中计算其最大幅值方向所对应的角度，与仿真结果进行对比，以判断裂纹角度。

本文选用试块材料为ZG06Cr13Ni5Mo铸钢，采用电火花加工不同角度裂纹缺陷，试块如图8所示。以不同角度贯穿槽模拟裂纹缺陷，槽长为1.5 mm，槽宽为0.5 mm，角度分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 五种，与仿真保持一致。另外在槽的左端加工一个圆孔缺陷，用于检测时的定位。

如图9所示为圆孔与不同角度裂纹缺陷的全聚焦检测结果。图9a为圆孔测成像结果，可以发现其长轴略

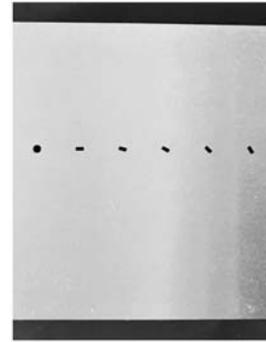


图8 不同角度缺陷的试块

Fig. 8 Specimen blocks with defects at different angles

长于短轴，并不是规则的圆形，这与超声波的衍射有关，部分声场会在其长轴方向绕射过缺陷，导致成像结果更偏椭圆。图9b为 0° 裂纹的成像结果，其长轴明显长于短轴，比较好的显示出缺陷形状。另外其颜色代表幅值，明显低于圆形缺陷。这是因为全聚焦成像中，超声波来源于各个方向，而圆形缺陷一定会垂直于其中某个角度的超声波，可以更好的反射超声波，因此，其幅值更高，而裂纹缺陷，只有垂直于长轴的超声波才会垂直反射，其它方向能量损耗太多。图9c-f为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 裂纹的成像结果，可以发现图像缺陷部分颜色越来越浅，说明被接收到的超声波越来越少，这与仿真结果保持一致。在 60° 时，仿真中散射信息几乎都横向传播，难以被晶片接收到，因此图9f已经失去了裂纹的形状，但仍可以检测出缺陷。

在裂纹为 15° 、 30° 、 45° 时，可以较为明显的分辨出裂纹角度。本文对成像前的原始幅值数据进行处理，计算其最大幅值方向所对应的角度，与仿真结果进行对比，如图10所示。由图10可以看出，在角度较小时，仿真结果与试验结果类似，但随着角度的增大，试验得到的角度小于仿真得到的角度，这是因为

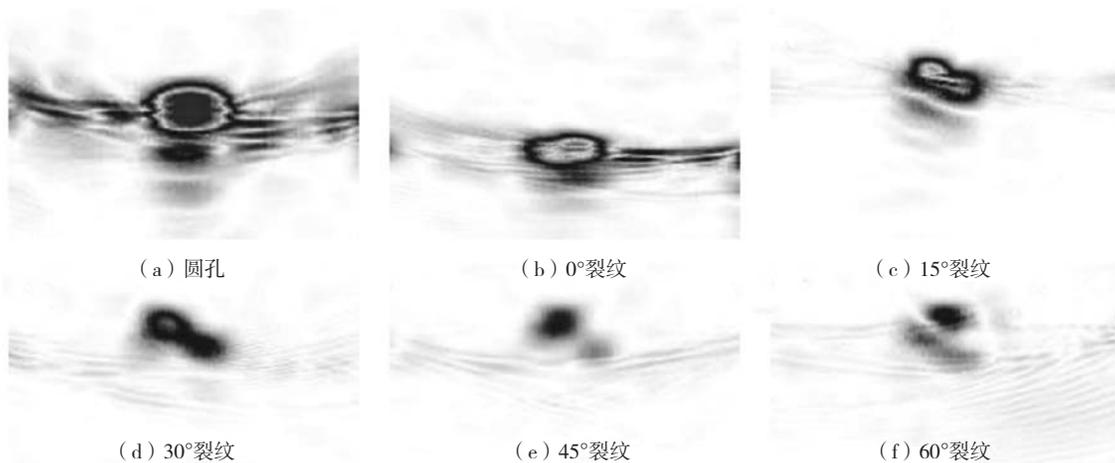


图9 全聚焦成像结果

Fig. 9 Results of total focus method

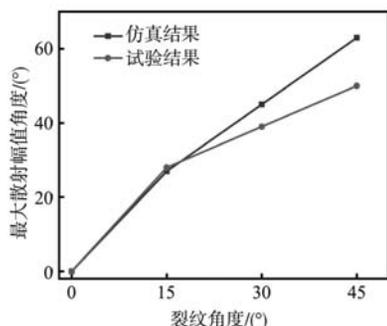


图10 不同角度裂纹的仿真与试验结果

Fig. 10 Simulation and experimental results of cracks at different angles

较大角度的散射信号难以被晶片接收到，无法成像。但通过本文，仍可以通过仿真与试验结果结合的方式，对裂纹的角度进行判断。

参考文献:

- [1] 滕子浩, 廖敦明, 吴棣, 等. 轧辊铸件成形过程热裂纹萌生与扩展数值模拟 [J]. 铸造, 2019, 68 (9): 1042-1047.
- [2] 拓凌玺, 李磊, 项鹏. 铸钢件浅表层缺陷的超声波检测 [J]. 铸造, 2020, 69 (4): 388-391.
- [3] 徐丽, 刚铁, 张明波, 等. 铸件缺陷无损检测方法的研究现状 [J]. 铸造, 2002 (9): 535-540.
- [4] ACHENBACH J D. Quantitative nondestructive evaluation [J]. International Journal of Solids & Structures, 2000, 37 (1-2): 13-27.
- [5] BOSTROMA, WIRDELIUSH. Ultrasonic probe modeling and nondestructive crack detection [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1995, 97 (5): 2836-2848.
- [6] ZHANG J, DRINKWATER B, WILCOX P. Defect characterization using an ultrasonic array to measure the scattering coefficient matrix [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, 55 (10): 2254-2265.
- [7] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Effects of array transducer inconsistencies on total focusing method imaging performance [J]. Ndt & E International, 2011, 44 (4): 361-368.

Study of Crack Defects in Castings at Different Angles Based on Scattering Information by Total Focus Method

LIU Shang-yu¹, ZHU Zhi¹, HOU Ling-ming², HOU Chun-yu¹, LI Xing-Jie¹, LIU Yang¹

(1. National Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., CAM, Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110000, Liaoning, China)

Abstract:

Crack defects seriously affect the quality of castings, the effects of different angles of cracks are different, so it is necessary to judge the crack angle. In this paper, we choose the simulation combined with experimental method, using phased array ultrasonic test (PAUT) means to analyze the imaging of cracks at different angles. Firstly, the defect scattering information is extracted by finite element simulation, the relationship between crack angle and scattering angle is established, and finally the crack angle is judged by full data acquisition and full focus imaging. The results show that the experimental results are consistent with the simulation results when the crack angle is small, and when the crack angle is large, it can be judged by the angle correspondence established in this paper.

Key words:

casting defects; phased array ultrasound; total focus method

4 结语

利用相控阵超声全聚焦检测手段对铸件内不同角度的裂纹进行了检测，通过仿真和试验对裂纹的角度与散射信号之间的角度进行了研究。仿真结果表明，超声波遇到不同角度裂纹后散射角度也不同，并且并非全部垂直于裂纹长轴方向，通过有限元模拟给出了不同角度裂纹所对应的声波散射角度。随后通过全聚焦算法对试验中获得的全矩阵数据进行处理，成像的同时提取声波散射角度。试验结果表明，在较小角度时，试验与仿真结果相似，随着角度增大，试验得到的角度逐渐偏小，但可通过本文仿真与试验的结果曲线，对裂纹的角度进行判断，进一步提升铸件的质量。