

基于超临界火电机组铸造高压管道 相控阵检测可检性研究

李 阳, 邓 韬

(国家能源集团科学技术研究院有限公司成都分公司, 四川成都 610073)

摘要: 为解决铸造管道内部缺陷常规超声检测中缺陷分辨率差、不直观、无法准确评定的问题, 尝试采用超声相控阵技术替代常规超声波进行检测, 通过模拟仿真、对比试块验证以及实际管道的检测试验, 验证了超声相控阵技术在铸造管道缺陷检测中的优势。

关键词: 铸造管道; 相控阵; 常规超声波; 缺陷; 优势

大型超临界火电机组高中压缸体和高中压导汽管制造生产中采用整体铸造成形, 焊接带有法兰的铸造短管, 再通过法兰螺栓连接带有另一边法兰的蒸汽管道, 检修时只需拆卸法兰螺栓解体缸体。铸件材料在制造过程中, 因制造工艺因素, 在铸件中不可避免的产生气孔、缩孔和砂眼等原始缺陷^[1], 验收标准又放宽了对铸件的检测验收要求, 允许存在一定数量和大小的非危害性缺陷, 但在机组运行过程中, 这些缺陷会随着机组运行工况的变化, 如应力释放、负荷变化、机组频繁启停等因素, 造成标准允许存在的未超标缺陷进一步扩展变大, 发展成影响机组安全运行的危害性缺陷, 这就要求机组在役运行期间, 对此类铸件管道进行监督检验, 以期在早期发现危害性缺陷并及时处理。

西南某电厂安装2台(2×660 MW)超临界火电机组, 汽轮机是东方汽轮机厂生产制造的型号为N660-24.6/568/568, 高中压导汽管和高中压缸体为砂型铸造件, 采用整体铸造成形, 规格为 $\Phi 330 \text{ mm} \times 53 \text{ mm}$, 材质为ZG15Cr1Mo1V, 过热蒸汽压力为25.83 MPa, 温度为573 °C。2020年机组大修解体, 对高中压导汽管表面磁粉检测中, 发现表面存在裂纹, 裂纹长50 mm, 深20 mm, 随即对裂纹挖补。对高中压导汽管母材实施常规超声波检测, 采用型号2.5 MHz $\Phi 14$ 直探头扫查, 在距表面20~38 mm, 区域500 mm×300 mm范围内存在缺陷回波和底波幅值降低现象, 直探头缺陷回波见图1a。采用2.5 MHz13×13K1斜探头扫查, 在深度20~38 mm, 相同区域范围内存在

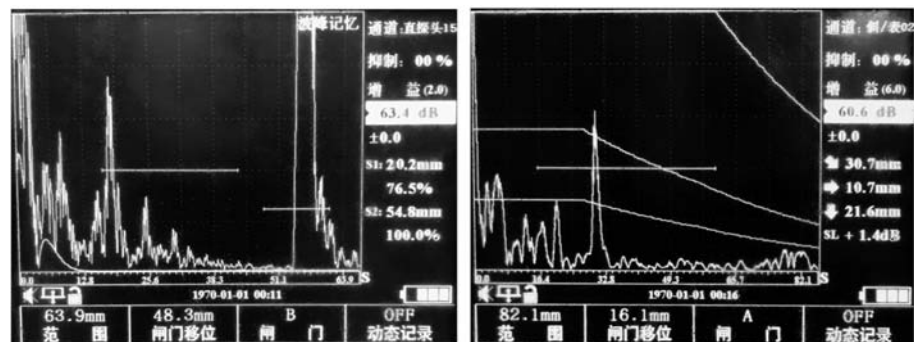
作者简介:

李 阳(1983-), 男, 工程师, 本科, 主要研究方向为电站金属材料无损检测和失效分析。电话: 18991287072, E-mail: 119182834@qq.com

中图分类号: TG115.28
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2022)10-1305-06

收稿日期:

2021-12-16 收到初稿,
2022-03-15 收到修订稿。



(a) 直探头

(b) 斜探头

图1 铸件管道缺陷回波图

Fig. 1 Echo diagram of defects of the casting pipe

缺陷回波,斜探头缺陷回波见图1b。前后或左右移动探头,缺陷回波波幅起伏变化,缺陷深度和水平位置也随即变动,且部分区域回波杂乱,信噪比低,无法分辨是具有长度或高度的单个缺陷还是密集型缺陷的连续分布^[2]。因常规超声波声束发散性,不具备聚焦性能或采用聚焦探头效果也不理想,且只能显示反映缺陷当量大小的波幅,分辨率低下,缺少缺陷的直观显示和密集型缺陷的鉴别能力,较难对缺陷进行评价。

1 铸件材料声学性能

为掌握该铸件材料晶粒度和声学衰减性能,对材料进行现场金相检验,材质(ZG15Cr1Mo1V)的金相组织见图2a,组织为铁素体+珠光体,晶粒度3~4级(平均晶粒直径0.127~0.090 mm)。

材料衰减系数等于散射衰减系数 a_s 和吸收衰减系数 a_a 之和,散射衰减系数 a_s 与晶粒度 d 成正比。当材料的晶粒度 d 小于波长 λ 时,吸收衰减系数 a_a 与晶粒度 d^3 、频率 f^4 成正比^[3]。选用2~2.5 MHz频率探头进行检测,

波长 λ 约为1.62~1.30 mm,晶粒度 d 远小于波长 λ ,材料的可检性与选择的频率有较大关系,当标准对灵敏度要求较高时,可选用较高频率的探头,这就要求被检铸件的晶粒度较细。

该铸件管道为在役管道,不能破坏制作试块,另选用材质、金相组织相同和晶粒度相当的材料加工试块,试块金相组织见图2b。试块加工具有两个不同声程 $R_{100}/200$ 圆弧,对两个 R 圆弧反射回波幅值测量,由于介质衰减,两个不同声程的 R 圆弧回波幅值不同,但两个 R 圆弧面声束反射情况基本相同,反射损失忽略不计,材料的超声衰减系数计算公式为:

$$a = \frac{20 \lg(B_{R1}/B_{R2})}{2(R_2 - R_1)} \quad (1)$$

式中: B_{R1} 、 B_{R2} 分别为 R_1 、 R_2 圆弧反射回波幅值; R_1 、 R_2 分别为试块 R_1 、 R_2 圆弧半径。

选用型号A11-2.25L32相控阵线性阵列探头,楔块型号SA11-N55S 2.25L32,经多次测量计算平均值,试块材料衰减系数约为0.187 dB/mm,横波声速为3 234 m/s。

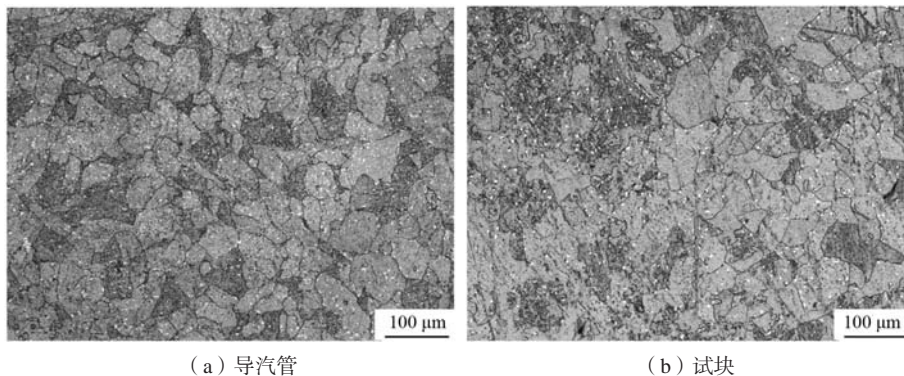


图2 材料金相组织图

Fig. 2 Metallographic microstructures of the materials

2 相控阵优势

传统超声和相控阵检测铸件材料时,均面临着晶粒粗大、透声性能差、声能衰减大等不利因素。常规超声单一晶片,声束角度固定,对于外形复杂的铸件,声场可达性较差,检测时探头来回移动扫查。由于声束具有发散性,采用聚焦探头时,则需制作一组不同聚焦深度的探头,检测时频繁更换探头。铸件内部缺陷类型和形状较复杂,传统超声缺陷显示不直观,只能显示反映缺陷大小和位置的脉冲幅值回波。分辨率较差,对密集型缺陷的评价较困难^[4]。

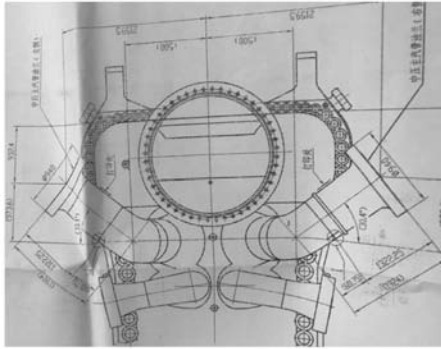
利用超声相控阵检测技术,可以很好地解决上述铸件管道内部缺陷常规超声检测不利因素的问题。相控阵检测是通过控制阵列换能器中各个阵元的激励与接收脉冲延迟时间,从而改变各个阵元接收(或发射)声波来自(或到达)物体某点时的相位关系,

实现声束方向和聚焦位置的变化,从而完成相控阵声束叠加合成,形成成像扫描^[5]。相控阵检测技术从不同方位对工件内部实时成像,缺陷显示直观,准确测量工件中缺陷的位置、大小和性质,提供了比单个探头系统更强的检测能力,可实现外形复杂工件检测,具有良好的声场可达性。同时,相比于传统超声检测,相控阵检测具有信噪比高、声束窄、检测范围大、分辨率高、检测效率高等优势。可实时变更聚焦法则,改变声束角度和聚焦参数,实现精准测量,无需更换探头。还可对结构复杂、材料声学性能差、声场可达性和可检性低的工件建模仿真,根据工件的检测条件、材料声学特性,模拟各种类型探头和检测工艺,同时还可模拟多种性质、大小和方位的缺陷,并对各种缺陷回波幅值比对,综合上述因素分析计算选择适宜的聚焦法则参数,以达到较好的检测效果。

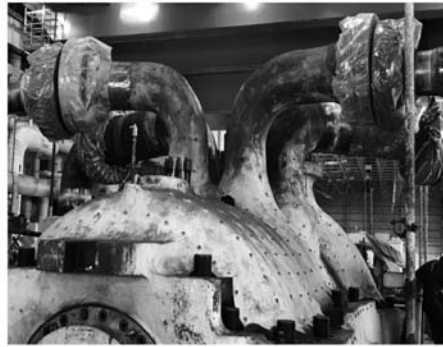
3 模拟仿真

见图3所示,高中压导汽管与高中压缸体整体砂型铸造成形,高中压导汽管焊接带有法兰的铸造短管,材质ZG15Cr1Mo1V,规格 $\Phi 330\text{ mm} \times 53\text{ mm}$,对于管

道内部纵向缺陷探头轴向放置,管道内部横向缺陷探头沿圆周放置,此外还须考虑探头沿圆周扫查过程中楔块与管道耦合效果,采用适合管道圆周半径弧度的楔块。



(a) 管道图纸



(b) 管道现场实际图

图3 铸件管道图纸和实际现场图

Fig. 3 Casting pipe drawing and actual site photo

3.1 建模

为分析相控阵检测铸件管道声场覆盖情况以及缺陷的检出、分辨能力,利用CIVA仿真软件对该铸件管道建模仿真。按实际比例建模,管道规格 $\Phi 330\text{ mm} \times 53\text{ mm}$ 及相同的外弧半径,设置材料衰减系数 0.187 dB/mm ,横波声速 $3\,234\text{ m/s}$ 。在管道壁厚的 $1/4$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ 处,设置1条横向模拟裂纹,再在垂直和水平方向间隔 5 mm 位置分别各设置1条裂纹,裂纹高度 3 mm 、长度 5 mm ,裂纹锯齿高度 $0.1\sim 0.25\text{ mm}$,再以相同方式设置3条纵向裂纹和直径 5 mm 球孔缺陷。

3.2 扫查方式和角度设置

模拟仿真选择扇形扫查方式,扇形扫查所形成角度范围内声束成扇面扩散,在工件中每一个位置的声束角度都不同。由于铸件内部缺陷方向不一致,扇形扫查对各个方位的缺陷均有一定检测灵敏度。随偏转角度的不同,声束经过楔块的声程不同以及不同角度的声压往复透射率不同,因此导致各个角度灵敏度不同^[6]。裂纹类缺陷多与表面垂直或成较大夹角,以检查裂纹类危害性缺陷为主,模拟仿真横波检测角度范围选择 $35^\circ\sim 75^\circ$ 。

3.3 探头选择

采用横波楔块扇形扫查,根据缺陷性质、位置和材料声学特性选择适宜的聚焦法则,主要考虑激发晶片数量,偏转角度以及聚焦方式,铸件材料晶粒粗大衰减严重,考虑使用低频探头^[7]。针对铸件内部密集型缺陷还需有较高的分辨率,聚焦方式根据工件中预设的缺陷位置选择不同的聚焦方式,如深度聚焦、声

程聚焦或等距离聚焦。管道半径较小还要考虑探头的耦合效果,不能选择太多晶片、尺寸较大探头,综合上述因素,模拟仿真选用型号A11-2.25L32线性阵列探头,楔块型号SA11-N55S 2.25L32。

3.4 仿真结果

选择型号A11-2.25L32线性阵列探头,楔块型号SA11-N55S 2.25L32,孔径 32 mm 晶片,偏转角度范围 $35^\circ\sim 75^\circ$,角度扫查步距 0.5° ,深度聚焦分别在壁厚的 $1/4$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ 处,仿真结果见图4a-c,结果表明,各个方位和深度的缺陷回波均能清晰显示,密集型缺陷能单独辨认测量,具有良好的分辨率,回波幅值均高于噪声 6 dB 以上,回波定位准确。图4d为选择型号A11-5L32线性阵列探头,设置无聚焦,楔块和其余参数与A11-2.25L探头参数一致,结果表明,选用A11-5L32线性阵列探头,回波幅值不大于噪声 6 dB ,铸件材料可探性下降。

3.5 仿真试验结果对比

常规超声不具有模拟仿真功能,对铸件内部缺陷检测存在盲目性。而相控阵模拟仿真试验,根据预估铸件中的缺陷位置、性质、分布以及结合材料声学特性、灵敏度要求、检测条件,在仿真软件中预设相应的检测参数和探头位置,计算出匹配的探头、聚焦法则和检测条件组合,选择最佳检测工艺,对铸件内部缺陷检测具有较强的目的性^[8],结果表明,相控阵对铸件材料检测相较于常规超声在理论研究上具有明显优势。

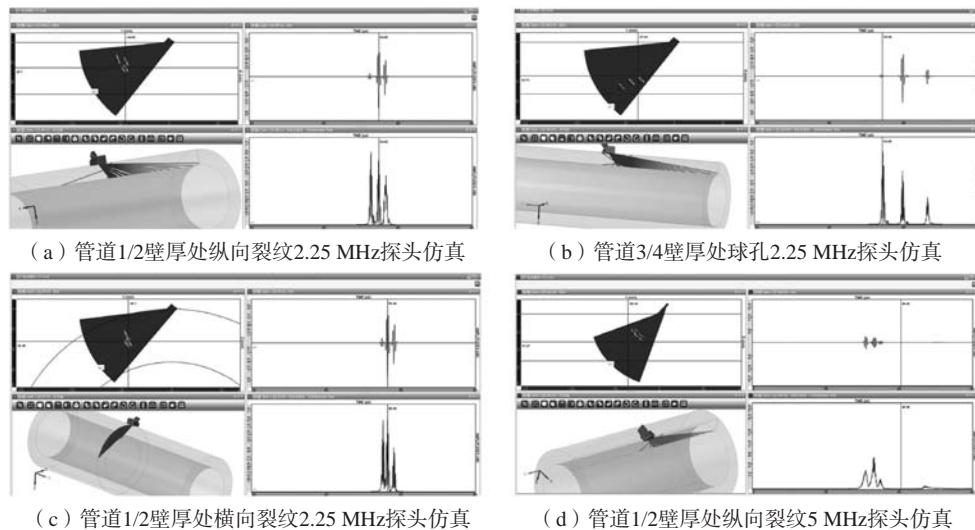


图4 管道缺陷模拟仿真图

Fig. 4 Simulation diagrams of the pipeline defects

4 对比试块测试

选用材质、金相组织相同，晶粒度相当的材料加工对比试块，试块制作参考B型相控阵试块，为测试相控阵对铸件材料中点状密集型缺陷的分辨率，对比试块中加工的参考反射体具有点状缺陷代表性的短横孔。在距表面20 mm处，垂直方向，间距2 mm，加工3个 $\Phi 2$ mm \times 6 mm短横孔。另沿半径35 mm圆周方向，每间隔 3° ，加工6个 $\Phi 2$ mm \times 6 mm短横孔。

4.1 对比试块相控阵测试

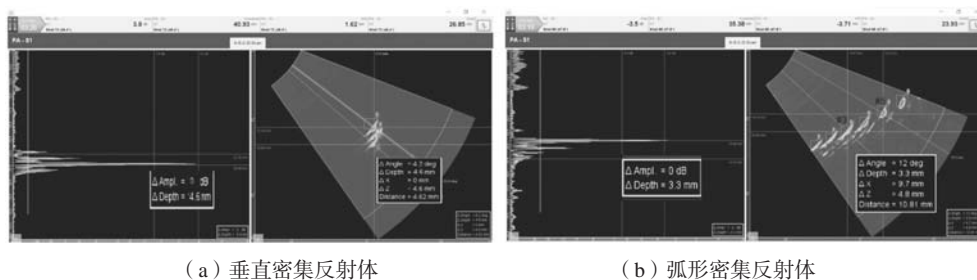
根据模拟仿真数据，选择型号A11-2.25L32线性阵列探头，楔块型号SA11-N55S 2.25L32，孔径32晶片，偏转角度范围 $35^\circ \sim 75^\circ$ ，角度扫描步距 0.5° ，对于垂直的3个反射体，根据预设反射体分布选择等距离聚焦，焦点倾角 0° 。对于沿半径35 mm圆周方向分布的反射体，选择35 mm等声程聚焦，设置材料声速3 234 m/s和衰减系数0.187 dB/mm。为保证每一步进角度声束对相同缺陷回波幅值一致，对扇形扫描聚焦法则范围内的每一步进角度声束增益校准补偿。添加A型和扇形成像显示，在实际检测中还应校准编码器和对工件耦合补

偿，以及探头沿圆周方向对管道内部横向缺陷扫查时，应采用适合管道圆周半径弧度的楔块，保证楔块与管道耦合效果。

对比试块相控阵测试见图5，在扇形显示中，不移动探头，预设的反射体均能清晰显示，单独辨认，分辨率较高， $\Phi 2$ mm短横孔反射体形状显示基本不失真，信噪比约14 dB。移动声束角度光标和测量光标，测量反射体之间的夹角和方位距离，如图5b中，3、5号反射体深度分别为24 mm、19 mm，高度分别为2.03 mm、1.94 mm，之间 Δ 角度= 12° ， Δ 深度=3.3 mm， $\Delta X=9.7$ mm， $\Delta Z=4.8$ mm，距离=10.81 mm。在A型显示中，读取反射体之间当量差值， Δ 幅值=0 dB等信息，测试结果与试块反射体信息一致，较容易对铸件密集型缺陷的评判。

4.2 对比试块常规超声测试

采用常规超声对试块中反射体检测，选择2.5 MHz 13 \times 13K1斜探头，设置材料声速3 234 m/s，衰减特性需根据试块调整灵敏度，对比试块常规超声检测见图6。前后移动探头对反射体扫查并找到最高反射回波，反射回



(a) 垂直密集反射体

(b) 弧形密集反射体

图5 对比试块密集反射体相控阵图

Fig. 5 Phase-array diagrams of the dense reflector in comparison blocks

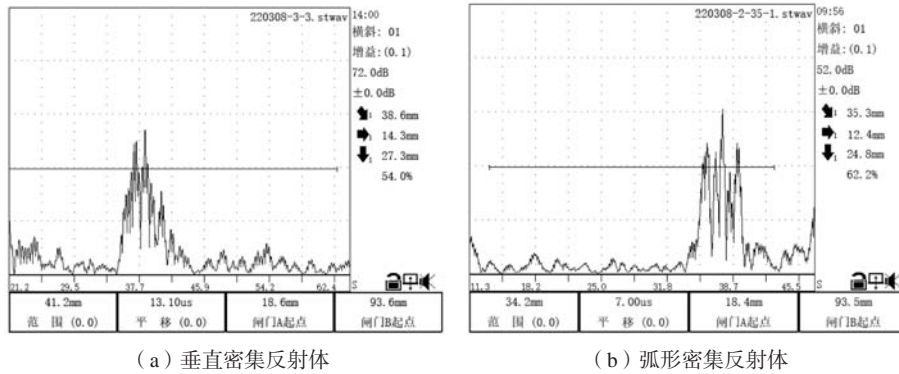


图6 对比试块密集反射体常规超声图

Fig. 6 Conventional sonography diagrams of the dense reflector of the test block

波依次起伏变化，位置信息也随即变动，回波连成一片，不能单独辨认，只能显示反射体的位置和当量信息，图6a中反射体显示深度范围20~28 mm，图6b中显示深度范围16~27 mm，而无法分辨是密集型反射体聚集还是具有长度或高度的单个反射体，信噪比约9 dB。如图6b中，对相控阵检测图（图5b）中的3、5号反射体扫查，无法分辨哪个波幅为该两个反射体所反射的回波，只能根据探头前后移动扫查过程中，回波起伏变化次数辨认，分辨率较差^[9]。

4.3 试块测试结果对比

通过常规超声和相控阵检测铸件试块对比，相控阵在不移动或少移动探头情况下完成检测，缺陷直观显示，单独辨认，能分析铸件中任意缺陷信息和空间位置分布。检测前预估铸件中缺陷类型和分布情况，针对性的选择适宜的聚焦法则，尤其对铸件中密集型缺陷检测，具有较强的分辨率和空间位置分布计算能力。而常规超声无直观显示，只能显示缺陷幅值和位置的波幅，分辨率较差，对密集型缺陷评价较困难。通过试块测试对比，表明相控阵对铸件材料检测相较于常规超声在实际检测中具有明显优势。

5 现场检测

针对常规超声检测西南某电厂超临界机组高中

压导汽铸件管道内部缺陷面临的技术难题采用相控阵检测。选择型号A11-2.25L32线性阵列探头，楔块型号SA11-N55S 2.25L32，孔径32晶片，偏转角度范围35°~75°，角度扫查步距0.5°，预估缺陷分布情况选择深度聚焦，聚焦范围20~40 mm，对于聚焦范围外扫查到的缺陷，再聚焦到具体位置进行精确扫查。设置材料声速3234 m/s和衰减系数0.187 dB/mm，校准编码器和灵敏度，沿管道圆周和轴向对导汽管母材扫查，相控阵缺陷图见图7，扇形显示中不同角度声束均能对管道内部各个方位、大小的缺陷直观清晰显示，在距表面20~38 mm，区域500 mm×300 mm范围内，缺陷沿深度和水平方向密集分布首尾未相连，缺陷单独存在、成不连续状。移动声束角度光标和测量光标，可直观分析各个缺陷信息以及之间的空间位置分布情况，方便评价缺陷。图7b中，1、4号缺陷深度分别为26.96 mm、20.56 mm，高度分别为2.27 mm和2.04 mm，当量分别为 $\Phi 2 \times 6 + 8.7$ dB和 $\Phi 2 \times 6 + 2.2$ dB、 Δ 角度=6.6°、 Δ 深度=6.4 mm、 $\Delta X=8.9$ mm、 $\Delta Z=4.5$ mm、距离=9.99 mm， Δ 幅值=6.5 dB等信息，可依次分析各个缺陷情况。

根据相控阵检测结果对铸件管道内部缺陷评价，为点状密集型缺陷，依据相关标准要求，建议加强监督检验，对缺陷信息详细记录，监控缺陷的发展趋势，并制定详细的监督检验措施。

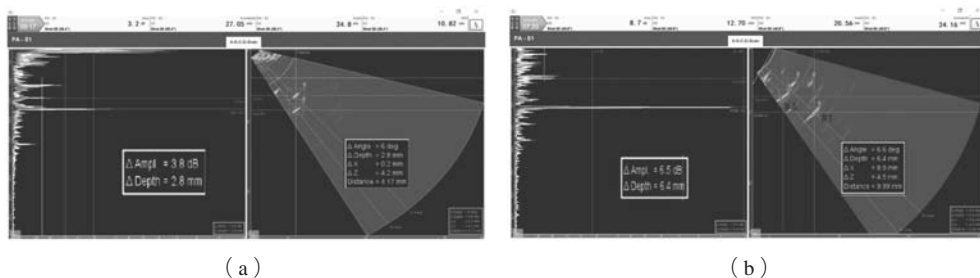


图7 铸件管道内部密集型缺陷相控阵图

Fig. 7 Phased array diagrams of the intensive defects in the casting pipe

6 结论

超声相控阵检测铸件管道具有良好的缺陷检出率和分辨率, 以及缺陷的直观显示, 较容易对缺陷进行评判, 解决了常规超声检测铸件类管道存在的缺陷分辨率低下、显示不直观, 尤其对密集型缺陷的评判不准, 无法评定是密集型缺陷聚集还是单个缺陷在

空间方向上的延伸, 对缺陷之间的空间位置分布较难界定, 缺陷定量、定性较困难等问题。通过对铸件管道缺陷模拟仿真、对比试块测试和实际管道相控阵检测, 结果表明, 相控阵检测铸件管道技术具有明显的优势, 对于类似铸件内部缺陷的无损检测具有较大的应用价值。

参考文献:

- [1] 张元华, 王玲玲. 铸件超声波探伤的缺陷分析研究——评《大型铸锻件及结构件超声波探伤》[J]. 铸造, 2021(1): 133.
- [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): 66-69.
- [3] 龙会国, 胡波涛. 铸钢件超声波衰减系数测量及其影响因素[J]. 铸造, 2011, 60(7): 676-679.
- [4] 郑晖, 林树青. 超声检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008.
- [5] 朱学耕, 董世运, 徐滨士. 相控阵超声检测技术在铸件质量控制中的应用[C]//中国机械工程学会铸造分会铸件质量控制及检测技术委员会第十一届学术年会暨天津市第十届铸造学术年会论文集, 2016: 37-44.
- [6] 王海涛, 史振, 程继隆, 等. 超声相控阵技术的仿真试验[J]. 无损检测, 2011, 33(2): 31-34.
- [7] 刘晓睿. 超声相控阵技术检测和评价方法研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- [8] 许波, 张子健, 吴家喜, 等. 承压设备典型母材缺陷的相控阵CIVA仿真与检测[J]. 无损检测, 2018, 40(10): 34-38.
- [9] 胡波涛, 龙会国. 铸钢件横波超声波检测工艺参数的影响[J]. 铸造, 2011, 60(3): 279-282.

Exploratory Study Based on Phased Array Detection of Casting High Pressure Pipeline in Supercritical Thermal Power Unit

LI Yang, DENG Tao

(China Energy Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610073, Sichuan, China)

Abstract:

In order to solve the problems of poor resolution, not intuitive and inaccurate evaluation of defects in conventional ultrasonic testing of internal defects of casting pipes, ultrasonic phased array technology was tried to replace conventional ultrasonic testing. The advantages of the ultrasonic phased array technology in the defect testing of the casting pipes were verified through simulation, comparison block verification and testing of the actual pipes.

Key words:

casting pipe; phased array; conventional ultrasonic; defect; advantage
