

等温淬火球墨铸铁厚壁工件无损检测方法的对比研究

章文显¹, 桑劲鹏², 胡珈源¹, 高立¹, 陆春宇¹

(1. 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所股份有限公司, 江苏常州 213011; 2. 无锡市产业创新研究院, 江苏无锡 214101)

摘要: 探讨了等温淬火球墨铸铁厚壁工件的孔洞类缺陷检测方法, 分别进行了常规超声检测、相控阵超声检测、 γ 射线照相检测和高能X射线数字成像检测试验。对于壁厚范围60~135 mm的区域, 超声检测体现了更高的检测灵敏度, 可以检出 $\Phi 0.9$ mm反射当量的单个缺陷以及区域性缺陷。Co60、Ir192以及9MeV射线数字成像检测的检测效果较差, 难以发现厚壁工件中细小的缺陷; 450 kV射线数字成像检测设备可以检出薄层结构的疏松。

关键词: 等温淬火球墨铸铁; 厚壁工件; 超声检测; 射线检测

等温淬火球墨铸铁具有强度高、塑性好、动载性能高、耐磨性好、抗噪性好、吸震性好等优点, 因此在各行业中的应用范围越来越广^[1-3]。在等温淬火球墨铸铁件的生产过程中, 不可避免产生一些缺陷, 诸如疏松、缩孔、气孔和渣眼等。通常采用射线检测、超声检测等方法检测球墨铸铁件内部的致密性。然而, 厚壁铸铁件存在较大的检测难度: 首先, 普通X射线穿透能力有限, 难以透照厚壁工件; 其次, Co60、高能X射线等射线源穿透能力强, 但检测灵敏度相对较低, 射线影像较差; 再次, 关于等温淬火球墨铸铁件超声检测的研究较少, 其声学特性未知, 可能存在较大的散射噪声及能量衰减。因此, 特开展超声检测、射线检测试验研究, 确定厚壁等温淬火球墨铸铁件(工件壁厚范围60~135 mm)的检测方法及检测效果。

1 常规超声检测技术及试验

采用 $\Phi 3$ mm平底孔验证厚壁等温淬火球墨铸铁件的超声可探性, $\Phi 3$ mm平底孔反射信号高于背景噪声12 dB以上, 其可探性良好。在参照GB/T 34904—2017 球墨铸铁件 超声检测的基础上, 提出了三种设定检测灵敏度的方式(表1): ①当量AVG, 通过某尺寸的平底孔制作AVG曲线, 检测过程中读取波幅达到或超过限度的信号当量; ②DAC曲线, 采用某尺寸的平底孔参考试块(图1)制作DAC曲线, 检测过程中读取信号与参考基准的相对关系; ③背景噪声极限, 将背景噪声调节至屏幕一定高度, 关注明显高于噪声的信号(如高于背景噪声6 dB以上的信号), 采用多种检测参数确认该信号为缺陷所致, 并对其定量。三种检测灵敏度设定方式如图2所示。

作者简介:

章文显(1985-), 男, 正高级工程师, 主要研究方向为轨道交通装备检测技术研究。E-mail: 165147094@qq.com

中图分类号: TG143.5;
TG115.2

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2024)
05-0683-05

收稿日期:

2023-02-06 收到初稿,
2023-12-28 收到修订稿。

表1 检测灵敏度设定

Table 1 Setting of testing sensitivity

设定方式	探头类型	参考反射体	反射信号定量
当量/AVG	单晶直探头	$\Phi 1$ mm/ $\Phi 2$ mm平底孔	具体当量/ ΦX mm
DAC曲线	双晶直探头	$\Phi 2$ mm/ $\Phi 5$ mm平底孔	DAC \pm XdB
背景噪声极限	单晶、双晶直探头		

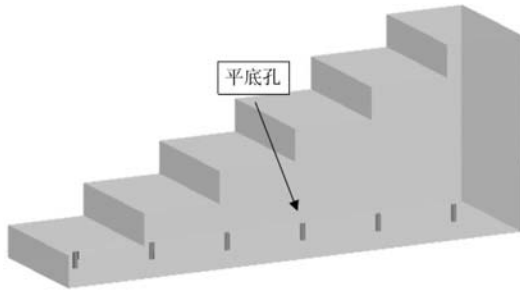
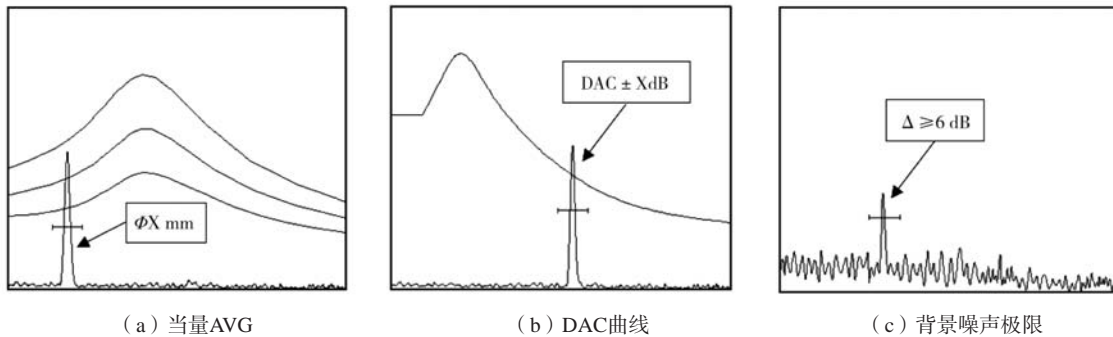


图1 用于制作DAC曲线的参考试块

Fig. 1 Reference block for plotting of distance-amplitude correction curve

常规超声检测过程中，存在3种典型信号：①如图3a-b所示，在没有缺陷的区域，可见较高的底面回波BG，以及较低的噪声N；②存在小缺陷的区域，可见达到一定波幅的缺陷信号，如图3c中的F；③存在大缺陷（区域性缺陷）的区域，可见底面回波BF大幅度降低，以及缺陷信号F，后者可能较低（不一定超过记录限）。

常规超声检测发现了若干达到 $\Phi 0.9\text{ mm} \sim \Phi 2\text{ mm}$ 当量平底孔直径的缺陷信号，以及1处底面回波降低较大的区域。



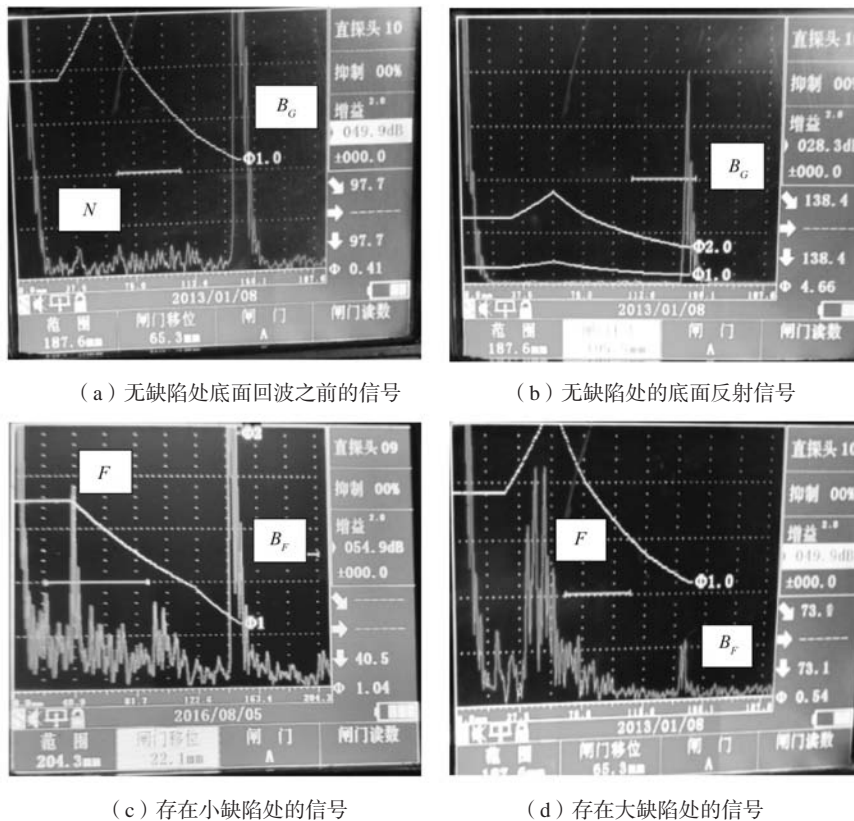
(a) 当量AVG

(b) DAC曲线

(c) 背景噪声极限

图2 检测灵敏度设定方式示意

Fig. 2 Diagram for setting of testing sensitivity



(a) 无缺陷处底面回波之前的信号

(b) 无缺陷处的底面反射信号

(c) 存在小缺陷处的信号

(d) 存在大缺陷处的信号

图3 常规超声检测信号

Fig. 3 Signals of general ultrasonic testing

2 相控阵超声检测技术及试验

双线阵换能器^[3] (Dual Linear Arrays, DLA) 如图4所示, 两个阵列分别发射和接收超声波。双线阵换能器可看作是传统双晶片超声换能器的阵列化方案, 可以削弱界面波对成像的影响, 对距表面一定深度的缺陷有良好的检出效果。双线阵换能器检测如图5所示。

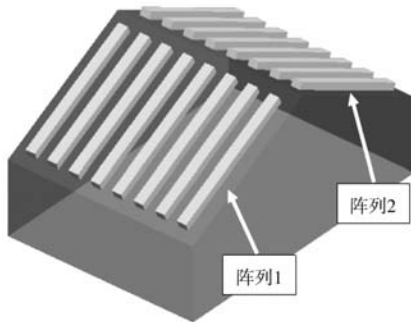


图4 双线阵换能器结构示意图
Fig. 4 Diagram for structure of dual linear arrays

采用双线阵换能器配合M2M的Gekko相控阵超声探伤仪对厚壁等温淬火球墨铸铁件进行相控阵超声检测试验, 检测过程中发现的典型信号如图6所示 (缺陷

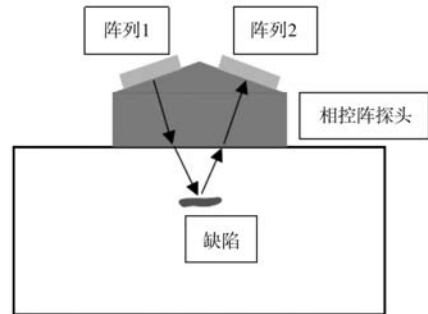


图5 采用双线阵换能器检测示意
Fig. 5 Diagram for testing using dual linear arrays

信号及图像为箭头所指处), 缺陷信号当量与常规超声检测的相近。

3 γ 射线照相检测技术及试验

采用Co60、Ir192进行 γ 射线照相检测试验, 射线源的选择符合ISO 5579: 2013对于Co60、Ir192透照厚度的规定。 γ 射线照相检测参数如表2所示, 在不同厚度得到的像质值如表3所示。

采用公式^[4]计算相对灵敏度。

$$K = (d/T) \times 100\% \quad (1)$$

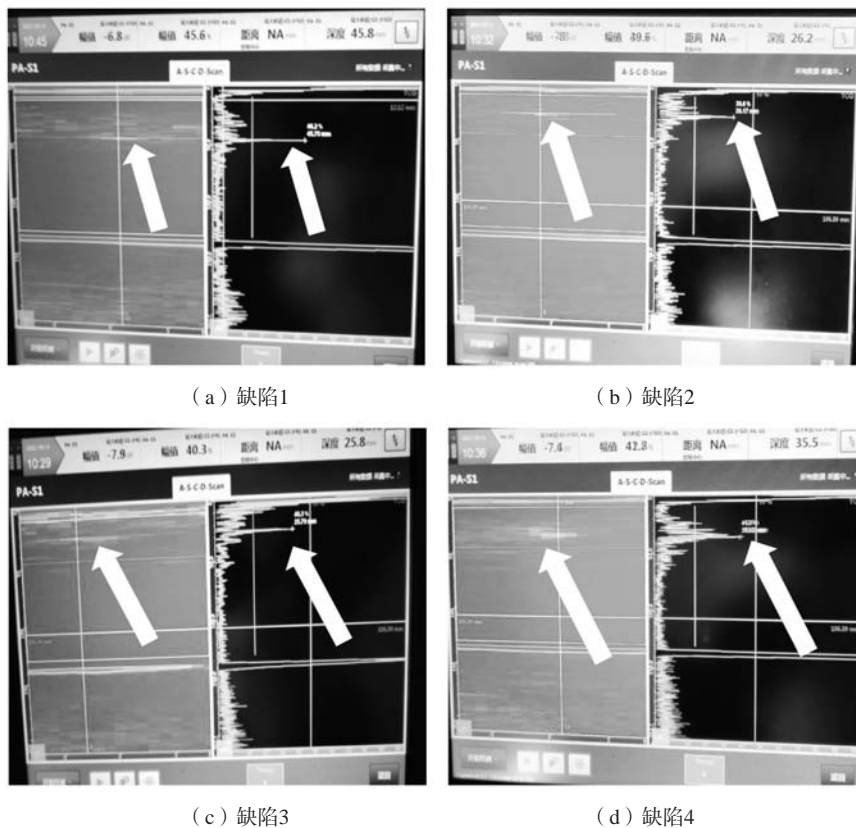


图6 相控阵检测检出的缺陷信号及图像
Fig. 6 Signals and images for defects detected by phased array ultrasonic testing

表2 γ 射线照相检测参数
Table 2 Parameters of radiographic testing

检测参数	数据
γ 源类型	Co60、Ir192
焦点尺寸/mm	4×4、3×2.6
源活度/Ci	81.7、40
曝光时间/min	3~32
焦距/mm	260~700
像质计	ASTM 1B11
	ASTM 1C16
黑度	1.5~4.0
像质计位置	源侧
增感屏	Pb0.254/0.254 mm, Pb0.1/0.1 mm

表3 不同厚度的像质值
Table 3 Image quality values of different thickness

透照厚度/mm	底片上可辨认的最细丝号
32	7
36	7
60	11
135	11、12

式中： K 为丝型像质计的射线照相相对灵敏度，mm； T 为被检工件的穿透厚度，mm； d 为射线照相底片上可辨认到的最细线的直径，mm。

分别将 $d=0.33$ 、 $d=0.81$ 、 $d=1.02$ 、 $T=32$ mm、 $T=36$ mm、 $T=60$ mm、 $T=135$ mm代入公式1，可得 K 分别为1.03%、0.92%、1.7%、0.6%和0.76%。可以发现，采用Co60透照135 mm厚度的工件时，获得了更高的相对灵敏度。

然而，对于常规超声检测及相控阵超声检测已检出的 $\Phi 0.9$ mm~ $\Phi 2$ mm当量显示，采用 γ 射线照相检测，并未在射线底片中发现相应缺陷影像。

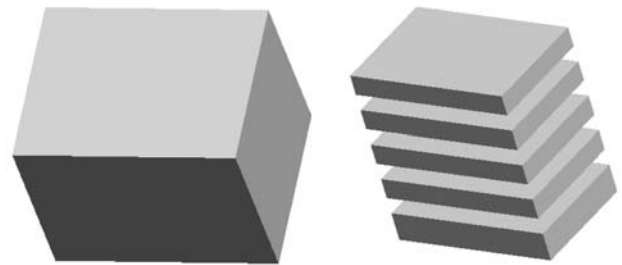
由于Ir192、Co60具有较高的能量，因此底片噪声会相应增大，干扰射线底片上小缺陷的影像显示^[4]。这种情况下，即使采用像质计验证得到较高的相对灵敏度，实际检测时也较难显示和识别小缺陷的影像。

4 高能X射线数字成像检测技术及试验

采用9MeV高能X射线数字成像设备对厚壁工件进行检测试验，符合ISO 5579: 2013的规定。结合丝型和双丝型像质计验证穿透135 mm的相对灵敏度。采用ASTM 1C16，可以识别丝号14，相对灵敏度1.19%，低于 γ 射线照相的相对灵敏度0.6%、0.76%。采用9MeV

高能X射线数字成像设备并未发现任何缺陷。这是由于透照厚度过大，而射线能量过强，灵敏度不高所致。

进一步，将厚壁工件线切割为薄层结构（如图7b所示，各层层厚范围25~35 mm），采用450 kV X射线数字成像设备对薄层结构进行检测，以期检出 γ 射线照相和高能X射线数字成像检测未检出的缺陷。



(a) 整体形态

(b) 切割后形态

图7 切割示意

Fig. 7 Diagram of cutting

如图8所示，经450 kV X射线数字成像检测，发现一薄层结构（厚度为30 mm）中存在疏松区域，与超声检测中底面回波大幅降低的区域相对应。

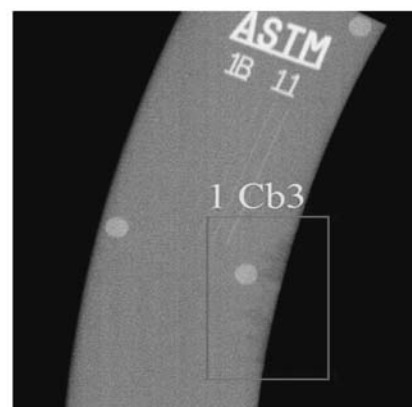


图8 疏松

Fig. 8 Microshrinkage

5 结论

本文分别采用常规超声检测、相控阵超声检测、 γ 射线照相检测和高能X射线数字成像检测开展了检测试验，研究发现：

(1) 常规超声检测和相控阵超声检测对于壁厚范围60~135 mm的区域，可以达到较高的检测灵敏度和信噪比，能够检出 $\Phi 0.9$ mm~ $\Phi 2$ mm当量平底孔直径的缺陷信号，以及底面回波信号大幅度降低的区域。

(2) 对于厚度135 mm的情况，9 MeV射线数字成像检测的相对灵敏度低于Co60 γ 射线照相检测，而两

种射线检测方法均未检出超声检测发现的缺陷信号和底面回波大幅度降低的区域。

(3) 将厚壁工件切割为薄层结构后, 通过450 kV X射线数字成像设备检出了疏松区域, 与超声检测识别

的底面回波大幅度降低区域一致。

(4) 对于60~135 mm厚壁等温淬火球墨铸钢件, 优选超声检测方法, 将常规超声检测和相控阵超声检测相结合, 即可得到理想的检测效果。

参考文献:

- [1] 曾艺成, 李克锐, 张忠仇, 等. 等温淬火球墨铸铁研发工作的进展与发展趋势 [J]. 铸造, 2017, 66 (9): 940-947.
- [2] 曾艺成. 等温淬火球墨铸铁生产技术的新进展 [J]. 现代铸铁, 2015, 35 (5): 19-25.
- [3] 姜利坤, 刘金海, 李国禄, 等. 等温淬火工艺对双相等淬球墨铸铁力学性能的研究 [J]. 铸造, 2009 (4): 368-372.
- [4] 万升云. 相控阵超声波检测技术及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [5] 强天鹏. 射线检测 [M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2007.

Comparative Study on Non-Destructive Testing Methods of Austempered Ductile Iron Thick-Walled Workpiece

ZHANG Wen-xian¹, SANG Jin-peng², HU Jia-yuan¹, GAO Li¹, LU Chun-yu¹

(1. CRRC Qishuyan Research Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China; 2. Wuxi Industrial Innovation Research Institute, Wuxi 214101, Jiangsu, China)

Abstract:

The cavity-type defect detection method of austempered ductile iron thick-walled workpiece is discussed. Conventional ultrasonic testing, phased array ultrasonic testing, γ radiographic testing and high energy x-ray digital radiographic testing are carried out respectively. For the area with wall thickness ranging from 60 mm to 135 mm, the ultrasonic testing shows higher detection sensitivity, and can detect single defects with $\Phi 0.9$ mm reflection equivalent and regional defects. The detection effect of Co60, Ir192 and 9MeV digital radiographic testing is poor, and it is difficult to find the fine defects in the thick-walled workpiece. The 450 kV digital radiographic testing can only detect the obvious shrinkage in the thick-walled workpiece.

Key words:

austempered ductile iron; thick-walled workpiece; ultrasonic testing; radiographic testing