

轨道交通铸钢制动盘缺陷 AUT 技术及试验研究

桑劲鹏, 万升云, 章文显

(中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏常州 213011)

摘要: 针对铸钢制动盘近表面、近底面缺陷检测效果差的问题, 设计了参考试块, 开展了检测参数研究, 对比分析后确定了适宜的频率、晶片直径和能量会聚深度。研制了自动超声检测装备, 设计了扫查路径和扫查参数, 可以实现铸钢制动盘两个盘面的快速检测。通过对参考试块、验证试样及实物的检测试验发现, 自动检测可以有效检出靠近表面2 mm的缺陷及靠近底面1 mm的缺陷。自动检测比手工检测的缺陷检出率更高、检测重复性更好、稳定性更高、检测效率大幅提升。

关键词: 制动盘; 自动超声检测; 近表面分辨力; 检测稳定性

铸钢制动盘是最重要的基础制动装置之一, 在国内主要型号的动车组上得到广泛应用^[1], 其性能在服役过程中的安全可靠将直接影响到列车的运行安全^[2]。实际制动过程中, 制动盘会经历加热和冷却循环, 不均匀的温度循环载荷将使制动盘产生不对称的循环交变应力, 在该循环交变应力的驱动下制动盘表面或内部缺陷处引起开裂并扩展形成热疲劳裂纹^[3-4]。铸钢制动盘不可避免地存在缩松、夹杂等缺陷, 影响了整体质量。制动盘摩擦面早期裂纹是由于非金属夹杂物数量超标、不合适的形态及分布所导致^[5]。采用纯净原料熔炼、底返式浇注系统、耐火砖管铺设浇道及设置过滤网等措施, 可使制动盘夹杂缺陷满足技术要求^[6]。

超声检测是铸钢制动盘质量检测的典型方法, 对缩孔、疏松、气孔等缺陷具有较高的检出率。但是, 受到近表面和近底面分辨力^[7]的影响, 对于靠近盘面5 mm和靠近盘体底面2 mm的缺陷检测效果不佳。

目前, 手工扫查是轨道交通铸钢制动盘超声检测的主要方式。制动盘面尺寸大, 手工扫查耗时费力, 且扫查与观察同步性要求高, 对检测人员的技能素养要求也较高。同时, 检测人员易受情绪、体力波动影响, 导致检测过程不稳定, 进而影响检测结果的可靠性。应对以上问题的普遍方法是实现稳定的自动化检测。国内关于AUT检测技术的基础和应用研究日益深入, 解决了诸如管材壁厚检测、管焊缝缺陷检测的多个技术难题, 为实现产品质量的快速稳定检测提供了参照^[8-11]。

本文拟通过设计试块、测试参数等途径确定理想的超声检测参数, 改善铸钢制动盘近表面、近底面缺陷的检测效果。研制自动超声检测装备, 确定适宜的扫查路径, 并通过试块、试样及实物的综合试验, 验证自动超声检测能力、稳定性及效率。

作者简介:

桑劲鹏(1985-), 男, 硕士, 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: 15996232796@163.com

中图分类号: TG247

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

01-0038-06

收稿日期:

2022-05-07 收到初稿,
2022-05-26 收到修订稿。

1 铸钢制动盘信息

铸钢制动盘及其尺寸信息如图1和表1所示。

表1 制动盘尺寸信息

Table 1 Dimension information of the brake disc

| 外径 d_1 /mm | 内径 d_2 /mm | 单面盘体厚度 T /mm |
|--------------|--------------|----------------|
| 640 | 350 | 24 |

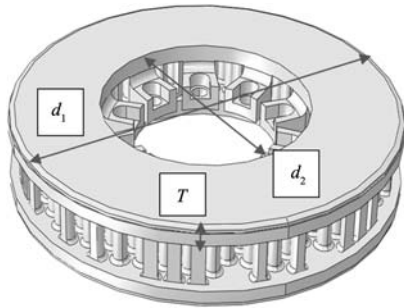
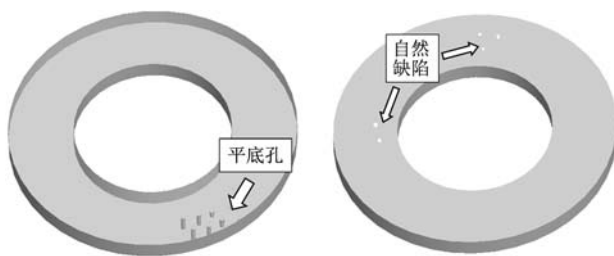


图1 制动盘
Fig. 1 Brake disc

2 试块与试样

依据ISO 4992-1: 2020《铸钢件 超声检测 第1部分: 一般用途铸钢件》, 铸钢件在超声检测前需验证可探性: 通过一定尺寸的平底孔反射波与背景噪声之间的信噪比确定超声检测可行性。ISO 4992-1: 2020同时规定了基于缺陷反射波幅的记录水平。根据Q/CRRC J 47.6—2019《轨道交通装备零部件无损检测 动车组 第6部分: 制动盘超声检测》中的规定, 需记录缺陷回波幅度等于或大于 $\Phi 2$ mm-6 dB的位置, 制动盘盘体摩擦面至以下12 mm厚度范围内不允许存在大于 $\Phi 2$ mm当量平底孔的缺陷, 且 $\Phi 2$ mm-6 dB~ $\Phi 2$ mm当量平底孔的缺陷不多于5个(缺陷间距离不小于25 mm)。综上, 本文采用 $\Phi 2$ mm平底孔验证超声可探性, 并以 $\Phi 2$ mm-6 dB作为记录水平及检测基准。试块如图2a所示, 在盘体中预制了覆盖检测深度范围的平底孔。考虑到超声近表面分辨力和近底面分辨力对检测效果的重要影响, 分别设置了靠近表面和靠近底面的平底孔, 用于测试超声近表面分辨力和近底面分辨力。平底孔位置及作用见表2。为了验证超声检测的实际效果, 本文制作了包含气孔、夹杂物、疏松等自然缺陷的验证试样, 如图2b所示。



(a) 平底孔参考试块 (b) 自然缺陷验证试样
图2 试块与试样

Fig. 2 Testing block and specimen

3 检测参数确定

根据Q/CRRC J 47.6—2019《轨道交通装备零部件无损检测 动车组 第6部分: 制动盘超声检测》中的规

表2 参考试块平底孔位置及作用
Table 2 The positions and function for the flat bottom holes of the reference block

| 平底孔编号 | 平底孔位置/mm | 作用 |
|----------------|----------|--------|
| 1 | 1 | |
| 2 | 2 | 近表面分辨力 |
| 3 | 3 | |
| 4 | 距盘体表面 | 5 |
| 5 | | 10 |
| 6 | | 15 |
| 7 ^a | | 20 |
| 8 | 距盘体底面 | 2 |
| 9 | | 1 |

注a: 7号平底孔还用来验证超声可探性。

定, 所使用的直探头或双晶探头, 其标称频率为1~5 MHz, 晶片有效直径为10~30 mm, 推荐焦距为10~20 mm。由于该技术参数范围较大, 不易选择, 因此结合ASTM E609-2012《铸造碳钢、低合金钢和马氏体不锈钢超声检测》辅助缩小选择范围。铸钢制动盘单面盘体厚度为24 mm, 根据ASTM E609-2012《铸造碳钢、低合金钢和马氏体不锈钢超声检测》的建议, 当铸件截面厚度不大于25 mm时, 选择频率5 MHz、晶片直径13~25 mm的双晶探头。通常, 频率、晶片大小、能量会聚深度对超声检测效果有直接影响。采用参考试块的平底孔对不同频率、晶片直径、能量会聚深度的检测情况进行探讨, 着重分析反射波幅和近表面、近底面分辨力。探讨的检测参数如表3所示。

表3 检测参数
Table 3 Testing parameters

| 频率/mm | 晶片直径/mm | 能量会聚深度/mm |
|-------|----------|-----------|
| 2.5、5 | 10、14、20 | 5、10、20 |

频率 f 、晶片直径 D 、能量会聚深度 FG 和波幅的关系如图3所示。可以发现, 晶片直径、能量会聚深度一定时, 5 MHz的探头比2.5 MHz的探头反射波幅高, 这与频率对灵敏度的影响一致; 频率、能量会聚深度一定时, $\Phi 20$ mm的探头波幅最高, 其次为 $\Phi 14$ mm的探头, $\Phi 10$ mm的探头波幅最低, 这与晶片直径对辐射声能、反射波幅的影响一致; 频率、晶片直径一定时, 不同的能量会聚深度对应了不同的波幅变化, $FG 5$ mm的探头近表面参考回波幅度更高, $FG 20$ mm的探头, 近底面参考回波幅度更高, 这与双晶探头的特点一致。

采用1、2、3号平底孔测试5 MHz、 $\Phi 20$ mm、 $FG 5$ mm探头的近表面分辨力, 采用8、9号平底孔测试5 MHz、 $\Phi 20$ mm、 $FG 20$ mm探头的近底面分辨力, 信

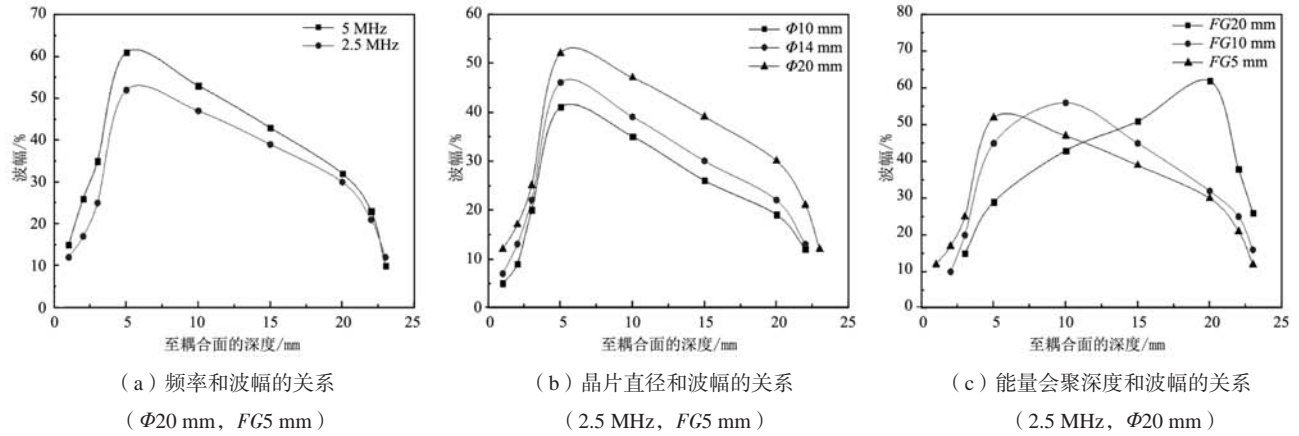


图3 频率、晶片直径、能量会聚深度和波幅的关系

Fig. 3 The relationships between frequency, element diameter, energy convergence depth and amplitude

号显示如图4a-e中所示(箭头所指位置)。可见,距表面1 mm的平底孔反射信号不易识别,而距表面2 mm、3 mm的平底孔反射信号清晰可辨;距底面2 mm、1 mm的平底孔信号清晰可辨。根据超声检测理论^[12],双晶探头能量会聚深度附近区域灵敏度和分辨力较高,因

此5 MHz、 $\Phi 20$ mm、 $FG5$ mm探头更适宜检测近表面缺陷,5 MHz、 $\Phi 20$ mm、 $FG20$ mm探头更适宜检测内部和近底面区域的缺陷。并且,两种探头的实际检测信噪比均超过12 dB,具有良好的超声可探性。

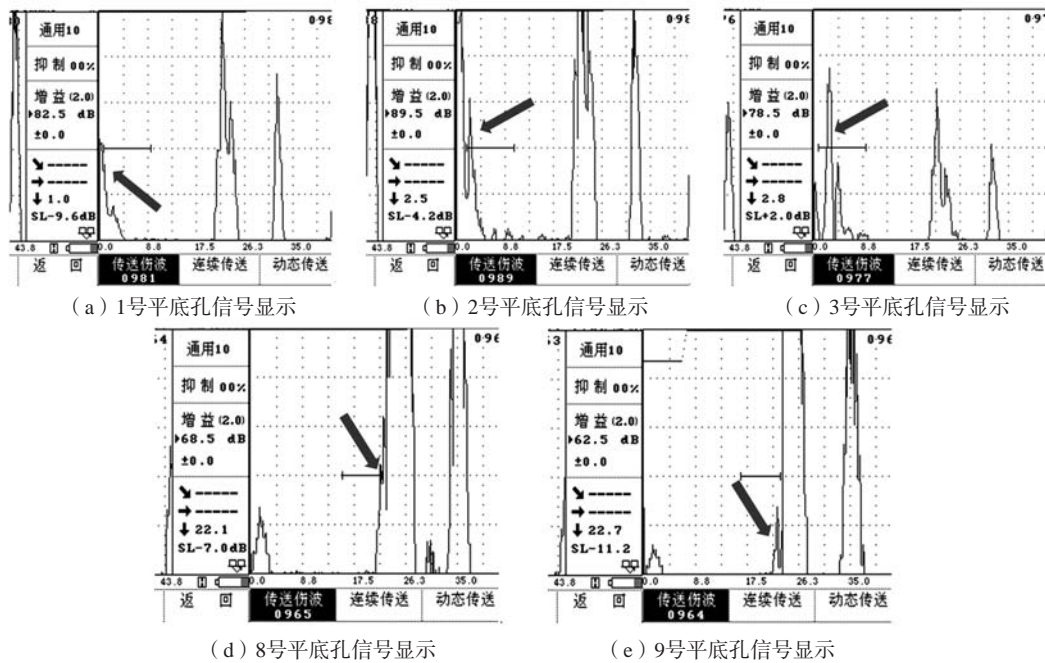


图4 近表面、近底面平底孔信号显示结果

Fig. 4 Signal display results of the near surface and near bottom flat bottom holes

4 检测装备及检测过程设计

4.1 AUT 装备

自动超声检测装备由机械系统、超声波检测系统及电气控制系统组成。如图5所示,机械部分主要由2个机械手(含探头夹持机构)、缓冲定位装置、V形支撑架等组成,可以同时完成铸钢制动盘两个盘面的扫查。

探头夹持机构如图6所示,一侧与机械手连接,包含2个探头座,探头座为自适应结构,包含压力弹簧,保证自动扫查时表面接触良好,实现自动超声扫查的耦合稳定性。

自动超声检测装备为四通道,分别对应2个机械手的4个探头,即覆盖两面盘体的各个截面区域。采用5 MHz、 $\Phi 20$ mm、 $FG5$ mm探头覆盖铸钢制动盘体近表面区域,采用5 MHz、 $\Phi 20$ mm、 $FG20$ mm铸钢制动

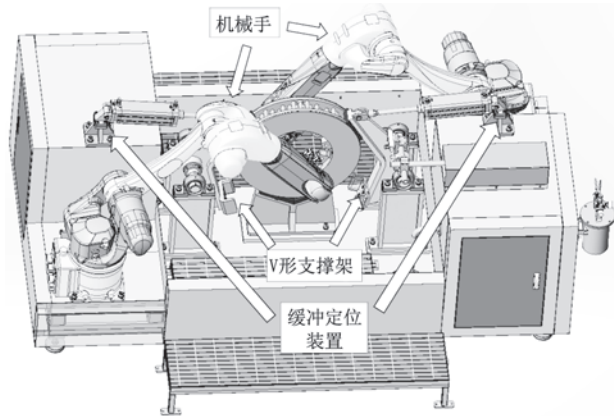


图5 超声自动检测装备机械系统
Fig. 5 Mechanical system of the AUT equipment

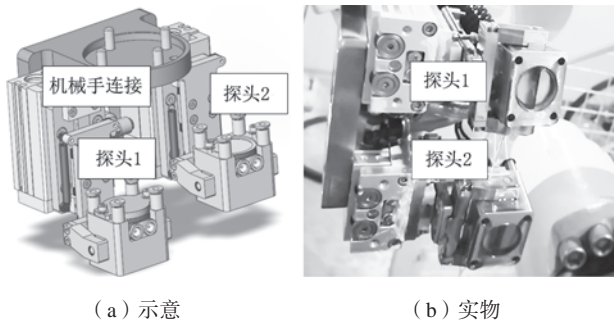


图6 探头夹持机构
Fig. 6 Probe holding mechanism

盘体其他区域。

4.2 检测过程设计

自动扫描路径如图7所示，采用周向扫描和径向步进相结合的方式。探头扫描装置初始位置为靠近外圆周的0点，沿逆时针或顺时针方向进行扫描。扫描一周后，根据声束覆盖范围作径向步进。再次进行圆周扫描，如此往复，直至完成内圆周范围的扫描。考虑到相邻扫描区域的完整覆盖，应确保探头宽度20%的检测重叠范围，最小径向步进值根据式(1)计算，最大扫描速度根据式(2)计算。

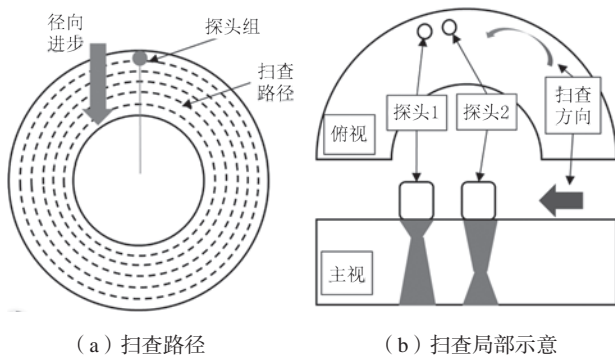


图7 自动扫描示意图
Fig. 7 Automatic scanning schematic diagram

$$x_{\max} = 0.8D_1 \quad (1)$$

式中： x_{\max} 为最大径向步进值，mm； D_1 为探头宽度，mm。

$$V_{\max} = \frac{D_2 \cdot PRF}{n} \quad (2)$$

式中： V_{\max} 为最大扫描速度，mm/s； D_2 为6 dB最小声束宽度，mm； PRF 为脉冲重复频率，Hz； n 为警报前连续信号个数。

4.3 数据显示

铸钢制动盘自动超声检测的数据显示如图8所示。包括A型显示、C型显示及累积信号（或带状图）。4个通道均有独立的3种显示类型，既可以分析波形准确的A型显示、累积信号，也可以直观地表示缺陷所在盘面投影位置。

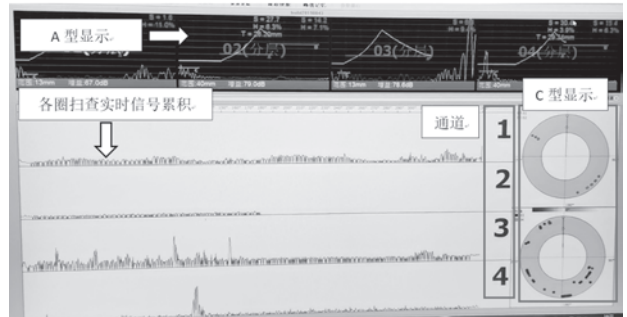


图8 检测过程中数据显示
Fig. 8 Data display during testing

5 检测试验

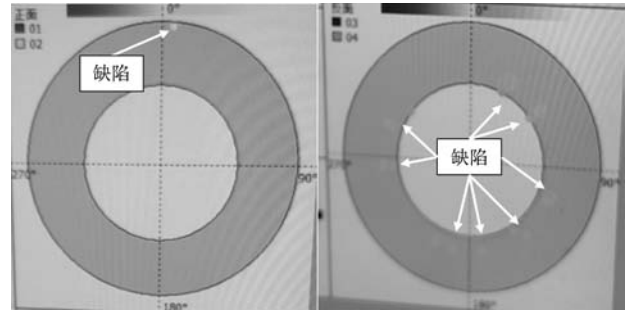
检测前根据工件结构、尺寸确定2个机械手的扫描轨迹。工件支撑在V型支撑架上，旋转定位机构对工件进行压紧，旋转定位机构、V形支撑架对工件进行初步定位。工件夹紧后，耦合系统中供油系统启动实现供油。机械手按预定的轨迹进行扫描，期间通过耦合面信号或周期性底面反射信号实现耦合监控。实际检测状态如图9所示。



图9 实际检测状态图
Fig. 9 Photo of the actual testing status

5.1 结果显示

对自然缺陷试样进行检测，显示图像如图10所示。分别在两个盘面发现若干缺陷，根据缺陷实际位置显示在C扫描模型的相应位置。经过滤波与固定信号处理技术，基本无干扰显示的背景噪声及非缺陷信号，缺陷显示清晰可辨。对发现缺陷的部位进行多次手工检测，验证缺陷波幅与自动检测的对比如表4所示。可见，自动检测的显示波幅普遍高于手工检测，可能是由于自适应耦合机构压力较大导致声能耦合效果好所致：超声接触法检测时，耦合层越薄，缺陷反射波越高^[13]。自动检测和手工检测的波幅偏差不大，



(a) 上盘面 (b) 下盘面

图10 缺陷检测显示图像

Fig. 10 Display images of the defect detection

表4 自动检测与手工检测的缺陷波幅对比

Table 4 Comparison of the defect amplitude between the automatic testing and manual testing

| 方式 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 自动 | Φ2-1 dB | Φ2-3 dB | Φ2-1 dB | Φ2+3 dB | Φ2-3 dB | Φ2+2 dB | Φ2 | Φ2-3 dB | Φ2 | Φ2-3 dB | Φ2-6 dB | Φ2-2 dB | Φ2-2 dB | Φ2-5 dB |
| 手工 | Φ2-2 dB | Φ2-6 dB | Φ2-3 dB | Φ2+2 dB | Φ2-7 dB | Φ2+1 dB | Φ2-5 dB | Φ2-5 dB | Φ2-3 dB | Φ2-6 dB | Φ2-6 dB | Φ2-5 dB | Φ2-3 dB | Φ2-5 dB |

需要注意的是，这是在自动检测发现缺陷后，采用手工检测的验证，而非手工盲检。

5.2 检测重复性和稳定性

采用平底孔参考试块、自然缺陷验证试样及铸钢制动盘实物验证自动超声检测重复性，并与手工扫查对比，结果见表5。8次自动扫查中，除第2次、第8次扫查未发现1号平底孔（距表面深度1 mm）外，其余各

次均检出所有平底孔；对于验证试样，则8次扫查均检出14处缺陷。手工扫查漏检了2次1号平底孔及1次9号平底孔；对于验证试样，则分别检出11处和12处自然缺陷，后经多次手工检测验证，识别了漏检的几处缺陷。

平底孔参考试块多次自动检测的平底孔反射回波分贝差如图11所示。以第1次扫查的各平底孔反射回波为基准，评定其余各次扫查的平底孔反射波幅与基准的偏差。除第2次、第8次扫查未发现1号平底孔（距表

表5 多次试验的检测重复性
Table 5 Repeatability of the multiple tests

| 试验对象 | 自动扫查次数 | | | | | | | | 手工扫查次数 | |
|----------|--------|----|----|----|----|----|----|----|--------|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 1 | 2 |
| 平底孔参考试块 | 9 | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 8 | 8 | 7 |
| 自然缺陷验证试样 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 11 | 12 |
| 铸钢制动盘实物 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

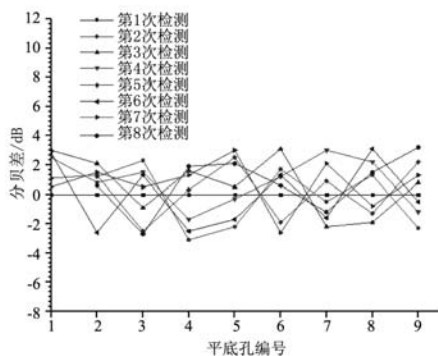


图11 平底孔参考试块经多次自动检测各平底孔回波的分贝差
Fig. 11 dB differences of each flat bottom holes echo for the multiple automatic tests

面深度1 mm)外，每次扫查的各平底孔反射回波的分贝差均在4 dB以内，体现了良好的检测稳定性。

5.3 检测效率

根据公式1计算径向步进值为16 mm，结合外径640 mm、内径350 mm，扫查速度取满足式(2)且较为适中的300 mm/s（线速度），计算得到自动车上检测的扫查时间见表6。实际测量铸钢制动盘的时间为80 s，包含每圈扫查之间的时间间隔。实测手工检测的时间约10 min（单面5 min），缺陷较多时附加较多评定时间，因此耗时更长。

表6 自动超声检测的扫查时间
Table 6 Scanning time of the AUT

| 扫查圈号 | 扫查周长/mm | 扫查时间/s |
|------|---------|--------|
| 1 | 1 985 | 6.6 |
| 2 | 1 885 | 6.3 |
| 3 | 1 784 | 6 |
| 4 | 1 684 | 5.7 |
| 5 | 1 583 | 5.3 |
| 6 | 1 483 | 5 |
| 7 | 1 382 | 4.7 |
| 8 | 1 282 | 4.3 |
| 9 | 1 181 | 4 |
| 10 | 1 125 | 3.8 |
| 累计 | 15 374 | 52 |

参考文献:

- [1] 王飞. 高速动车组用铸钢制动盘试验分析 [J]. 铁道车辆, 2018, 56 (1): 5-7.
- [2] 李和平, 林枯亭. 高速列车基础制动系统的设计研究 [J]. 中国铁道科学, 2003, 24 (2): 8-13.
- [3] 杨智勇, 韩建民, 李卫京, 等. 制动盘制动过程的热-机耦合仿真 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (2): 88-92.
- [4] 杨月, 谢基龙. 高速客车SiC_p/A356铝基制动盘材料的热疲劳裂纹形成与扩展试验研究 [J]. 铁道学报, 2007, 29 (5): 43-46.
- [5] 钱坤才, 张俊新. 非金属夹杂物引起铸钢制动盘早期裂纹的研究 [J]. 铸造, 2014, 63 (11): 1161-1164.
- [6] 孙逊, 时坚, 税国彦, 等. 高速列车铸钢制动盘铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (12): 1348-1355.
- [7] 万升云. 超声波检测技术及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [8] 唐玉恒, 黄云, 邹莱. 钛合金管材壁厚自动超声检测装置研制 [J]. 机械科学与技术, 2017, 36 (8): 1255-1259.
- [9] 黄磊, 赵新伟, 王长安, 等. 直缝埋弧焊钢管焊缝自动超声波检测方法探讨 [J]. 物理测试, 2016, 34 (2): 20-25.
- [10] 吕新星. 基于非内自动焊机的管道自动焊自动超声检测工艺 [J]. 无损检测, 2019, 41 (5): 28-32.
- [11] 陈巍. 核燃料棒端塞焊缝超声特征扫描检测系统研制 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- [12] 李家伟. 无损检测手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [13] 郑晖, 林树青. 超声检测 [M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008.

6 结论

(1) 该检测技术及系统已应用于铸钢制动盘的精加工前超声检测, 由于剩余加工余量约2 mm, 从而解决了近表面缺陷漏检的关键问题, 并成为解放人力、提高整体生产效率的重要措施。

(2) 通过对频率、晶片直径、能量会聚深度等参数的对比研究, 确定铸钢近表面缺陷检测采用5 MHz、 $\Phi 20$ mm、FG5 mm的探头, 内部及近底面缺陷检测采用5 MHz、 $\Phi 20$ mm、FG20 mm的探头。

(3) 研制了具有多种显示的自动超声检测装备, 设计了扫查路径, 明确了扫查步进值和扫查速度。自动检测可以有效检出靠近表面2 mm的缺陷及靠近底面1 mm的缺陷; 自动检测比手工检测的缺陷检出率更高、检测重复性更好、稳定性更高, 且检测效率大幅度提升。

Automatic Ultrasonic Testing Technique and Experimental Study on Defects of Cast Steel Brake Disc in Rail Transit

SANG Jin-peng, WAN Sheng-yun, ZHANG Wen-xian
(CRRC Qishuyan Research Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

Abstract:

A reference test block was designed and the testing parameters were studied to solve the problem of poor detection effect for near surface and near bottom surface of cast steel brake disc. After comparative analysis, the appropriate frequency, element diameter and energy convergence depth were determined. The automatic ultrasonic testing (AUT) equipment was developed, and the scanning path and parameters were designed, which could test rapidly the two faces of the cast steel brake disc. Through the test of reference blocks, specimen and real objects, it is found that the automatic testing could effectively detect the defects 2 mm near the surface and 1 mm near the bottom surface. Automatic testing showed higher defect detection rate, better testing repeatability and higher stability than manual testing. Compared with the manual testing, the efficiency of the automatic testing was greatly improved.

Key words: brake disc; automatic ultrasonic testing; resolution of near surface; testing stability