

铝合金轮毂铸造缺陷超声波检测系统的研究

柴亚珂, 吴瑞明, 胡益旻, 陈凯旋

(浙江科技学院 机械与能源工程学院, 杭州 310023)

摘要: 针对铝合金轮毂铸造缺陷造成的汽车安全隐患问题,利用铝合金轮毂铸造缺陷超声波检测技术和原理,采用水浸式超声波检测方法对铝合金轮毂铸造缺陷进行检测,并利用小波变换时频图及超声C图像判断铝合金轮毂的铸造缺陷特征。研究表明:水浸式超声波检测技术对铝合金轮毂铸造缺陷的检测,结合超声波A型波和时频图可以判断出铝合金轮毂内部是否有缺陷存在及缺陷的大小和位置,且通过超声波A型波转换得到的超声C图像可以更加直观地判断出缺陷的特征。可见,我们设计的铝合金轮毂铸造缺陷超声波检测系统可用于缺陷检测。

关键词: 铝合金轮毂;铸造缺陷;超声波检测;时频分析;C图像

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2019)06-0470-06

Study on ultrasonic testing system for casting defects of aluminum alloy wheel hub

CHAI Yake, WU Ruiming, HU Yimin, CHEN Kaixuan

(School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: In view of the hidden danger of automobile safety caused by the casting defects of aluminum alloy wheel hub, the study applied the method of water immersion ultrasonic testing technology to detect the casting defects of aluminum alloy wheel hub, and judged the characteristics of casting defects of aluminum alloy wheel hub with the time-frequency diagram of wavelet transform and the ultrasonic C image. The test results show that the detection of casting defects of aluminum alloy wheel hub with water immersion ultrasonic testing technology, combined with A-wave and time-frequency diagram, can identify the existence, size and location of defects in the aluminum alloy wheel hub, and the generated ultrasonic C image can more intuitively determine the characteristics of defects. It can be concluded that the developed ultrasonic detection system is feasible for casting defects of aluminum alloy wheel hub.

Keywords: aluminum wheel hub; casting defects; ultrasonic detection; time-frequency analysis; Cimage

收稿日期: 2019-07-23

通信作者: 吴瑞明(1970—),男,浙江省义乌人,副教授,博士,主要从事无损评价、汽车检测研究。E-mail: wuruiming@163.com。

随着汽车行业的蓬勃发展,轻量化、节能、减排成为现代汽车行业的发展方向,因此,近些年来汽车零部件用材逐渐进入了铝合金时代。铝合金轮毂制造工艺有锻造、重力铸造、低压铸造等^[1-2],目前低压铸造工艺在铝合金轮毂的制造中应用最广泛^[3],虽然低压铸造工艺在国内外都比较成熟,但在铸造过程中仍有可能出现低压铸造缺陷。铝合金轮毂在低压铸造过程中常见的缺陷有气孔、裂纹、缩孔、缩松和冷隔等^[4],这些缺陷对在路面上行驶的汽车都是严重的隐患,长时间使用可能会造成严重的交通事故甚至危及生命^[5-6]。因此要预先对铝合金轮毂的这些潜在缺陷进行检测以保证使用的安全。铝合金轮毂缺陷检测常用的无损件检测方法包括超声检测法和射线检测法。刘军等^[7-9]均采用射线成像检测方法对铝合金轮毂缺陷进行了检测,可以直观地显示出轮毂内部及表面的缺陷,但射线在检测过程中会对人体及环境造成一定的危害,不能满足无害检测环境的要求,并且成本较高。而超声波检测技术灵敏度高、穿透力强、对人体及环境无害,因此应用相对比较广泛。赵艳春等^[10-11]对铝合金工件水浸超声波检测系统进行了研究,能够实现超声波自动化检测,通过超声波 A 型波、C 图像判断工件中是否有缺陷及缺陷特征;夏沙等^[12]提出一套运用于轮毂曲面检测的超声波自动检测系统,较好地解决了手工检测效率低的问题;田明明等^[13-14]通过对采集到的超声波检测信号进行处理和分析,可以判断出缺陷的特征;Romanishin 等^[15]提出了一种厚壁件超声波检测中反射信号的处理方法,该方法将记录信号的强度归一化为从信号发射时刻到第一个反射回波信号的每个周期的能量判断缺陷特征。在上述研究的基础上,我们设计了一种基于频域分析和小波分析的铝合金轮毂铸造缺陷超声自动检测系统,可实现对铝合金轮毂铸造缺陷类型、位置和大小的判断。

1 超声波检测原理

目前,在工业中超声波检测技术是应用最广泛的一种无损检测技术,可以在不破坏工件或者原材料工作状态的情况下,对工件的表面及内部质量进行检测,以判断是否达到质量标准。超声波检测是根据超声波在工件传播中遇到不同界面时会出现反射、折射、透射和散射等现象,以此来对工件中的缺陷进行检测和判定。脉冲反射法探伤是超声波无损检测常用的一种方法,采用超声波脉冲反射法对铝合金轮毂缺陷进行检测时,超声波探头接收到的超声回波信号是由表面回波信号、缺陷回波信号、底面回波信号及噪声信号组成。

我们设计的检测系统采用水浸纵波脉冲发射法对铝合金轮毂轮辋部位缺陷进行超声波检测,水作为耦合剂,选取单个水浸聚焦探头,检测原理为:首先超声波探头发射超声波信号并入射到铝合金轮毂轮辋内部,在传播过程中超声波信号遇到异性介质时发生反射现象,通过超声波探头接收反射回来的超声波反射信号;然后利用超声采集卡获取超声波反射信号并以 A 型波形式显示出来;最后对超声波反射信号进行处理分析并判断铝合金轮毂轮辋曲面内部是否存在缺陷及缺陷的大小和位置。

图 1 为水浸式超声波检测原理,外圆表示铝合金轮毂轮辋曲面外壁,内圆表示铝合金轮毂轮辋曲面内壁,探头的位置表示在检测过程中探头所扫描的某一位置。 T 代表轮毂轮辋曲面外壁反射回波, F 代表缺陷回波, B 代表轮毂轮辋曲面内壁反射回波。当铝合金轮毂内无缺陷存在时,超声波检测信号以 A 型波显示,只有表面回波信号和底面回波信号存在;当铝合金轮毂内有缺陷存在时,超声波检测信号以 A 型波显示,除了表面回波和底面回波外,还有缺陷回波存在。最后对超声波检测信号进行时频分析,并结合去噪后的超声波 A 型波转换得到的超声 C 图像,更加直观地去判断铝合金轮毂内部缺陷的特征。在超声波检测过程中,需要保证探头声束轴线与铝合金轮毂被检测点所在表面法线重合^[16]。

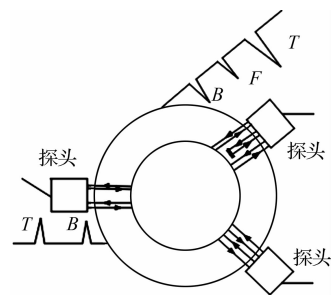


图 1 水浸式超声波检测原理

Fig. 1 Principle of water immersion pulse reflection inspection

2 超声波检测系统的设计

2.1 超声波检测系统的组成

水浸式超声波检测系统主要由三自由度机械手扫描运动系统、超声波探头、USB-UT350 超声采集

卡、铝合金轮毂、工控机、显示器、打印机等组成。该系统结构如图 2 所示。

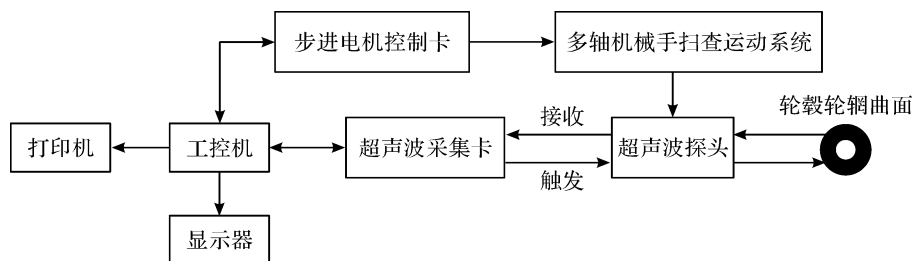


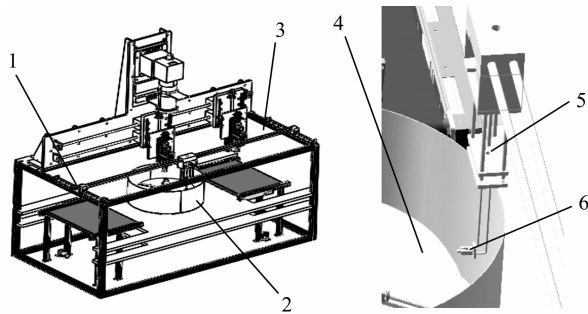
图 2 超声波检测系统结构

Fig. 2 Structure of ultrasonic detection system

系统的工作步骤如下：第一，确定铝合金轮毂轮辋曲面的扫查方式、扫查参数及扫查路径；第二，步进电机控制卡控制机械手扫查机构的探头执行器沿铝合金轮毂轮辋曲面匀速移动，从而实现对铝合金轮毂轮辋曲面的全面自动扫查；第三，通过超声波采集卡收集检测数据，工控机读取超声采集卡存储的采集数据并显示出超声波 A 型波信号，选择合适的超声波信号处理方法对超声波回波进行处理，显示铝合金轮毂缺陷图像；第四，对回波信号中的缺陷回波和图像进行分析，得出检测结果，并对检测结果进行打印。

2.2 铝合金轮毂超声波检测机械结构设计

针对铝合金轮毂超声波检测设备结构进行的设计，主要包括 X、Y、Z 方向导轨、轮毂旋转台、探头夹、水箱，可以实现轮毂轮辋部位的全覆盖自动化检测及提高检测效率。超声波检测系统的机械结构设计如图 3 所示，该系统包含 3 个自由度，分别为 X、Y、Z 轴 3 个方向上的移动自由度。系统的各轴之间可以实现联动，其中 X、Y 轴为系统中探头调整位置的方向，当探头在 X、Y 轴上调整到最佳位置后，探头此时固定不动，铝合金轮毂在底部位于水箱内的固定座上以一定的速度匀速旋转，探头在 Z 轴上可以调节高度，通过在不同高度的检测来完成对整个轮毂的轮辋部位的检测。



1—X 方向导轨；2—水箱；3—Y 方向导轨；4—轮毂旋转台；5—Z 方向导轨；6—探头夹。

图 3 超声波检测机械结构

Fig. 3 Ultrasonic detection mechanism

3 超声波信号处理与分析

3.1 小波变换原理

采用小波变换的方法对超声波信号进行分析。小波变换是一种时间窗和频率窗都可以改变的时频分析方法，即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率，在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率，在时频域内具有很强的表征信号局部特征的能力，因此小波分析是适合超声波非平稳信号时频表达的最佳时频分析方法。首先要对采集到的超声波 A 型波信号进行傅里叶变换，得到超声波信号频域图；接着对超声波 A 型波信号进行小波变换得到超声波信号时频图；最后对去噪后的超声波 A 型波信号进行超声波 C 图像的转换。通过超声波 A 型波信号、时频变换及超声波 C 图像来判断铝合金轮毂曲面内部是否有缺陷存在及缺陷的位置和大小。

信号 $f(t)$ 经过傅里叶变换的正变换公式为

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt,$$

$F(\omega)$ 称为信号 $f(t)$ 的频谱。

对于信号函数 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ ，小波 $\psi(t)$ 的积分小波变换定义为

$$W_{\psi}f(b,a) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi_{b,a}(t)} dt. \quad (1)$$

式(1)中: $W_{\psi}f(b,a)$ 为小波基变换系数; $\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 。

小波变换的时间频率窗 $\hat{\psi}(\omega)$ 是具有带通滤波器特性的小波窗。时间频率窗内的信息分别为

$$\left[at^* + b - a\Delta_{\psi}, at^* + b + a\Delta_{\psi}\right]; \quad (2)$$

$$\left[\frac{1}{a}(\omega_+^* - \Delta\hat{\psi}^+), \frac{1}{a}(\omega_+^* + \Delta\hat{\psi}^+)\right]. \quad (3)$$

式(2)~(3)中: t^* 、 $\Delta\hat{\psi}$ 分别为 $\psi(t)$ 的中心和半径; ω_+^* 、 $\Delta\hat{\psi}^+$ 分别为 $\hat{\psi}(\omega)$ 的中心和半径。

由式(2)~(3)可知,小波变换的时间频率窗不随尺度参数 a 和平移参数 b 的变化而变化,但是时间频率窗的边长却在变化。尺度参数增加时, $\psi_{b,a}(t)$ 的时间窗增加,频率窗减小;反之亦然。

为了减小小波变换的系数冗余度,将小波变换基函数 $\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 中的 a 、 b 限定在一些离散的点上取值,即得到离散小波变换函数

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2}\psi\left(\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j}\right) = a_0^{-j/2}\psi(a_0^{-j}t - kb_0).$$

3.2 超声波无缺陷信号的分析

在超声波回波信号小波分析中,常采用的小波基函数有CMOR、dbN、symN。经过对比分析,本文采用CMOR小波基函数进行小波时频分析,小波函数的带宽 $F_b=1$,中心频率 $F_c=1$ 。

已知铝合金轮毂不含缺陷,使用 15×10^6 Hz的聚焦探头,中心频率为 5×10^6 Hz,采样频率为 5×10^8 Hz,采用弓形路线扫查,步距为0.25 mm,扫查区域为30 mm \times 25 mm,采样点数为2 622。利用MATLAB对超声波时域信号1进行傅里叶变换和小波时频变换,结果如图4所示。由图4(a)可知,超声波声束到达试件外表面时发生反射作用,使超声波的幅值达到较大的状态,随着声束继续在均匀介质试件中传播,探头接收到声波的幅值保持较小的状态,当声束传到试件内曲面时,超声波探头接收到的声波幅值再次达到较大的状态;由图4(c)可知,回波信号的主频为 6.87×10^6 Hz,由图4(a)只能模糊判断前表面回波和底面回波,无法准确判断是否有缺陷回波存在及缺陷的位置,而结合图4(a)和(d)则可以明显地看出超声波回波信号的前表面波和底面回波,还可以看出此超声波回波信号中不含缺陷回波;由图4(a)可以看出前表面波和底面回波信号的幅值很大,而中间部分幅值很小;由图4(d)可以看出超声波回波信号时

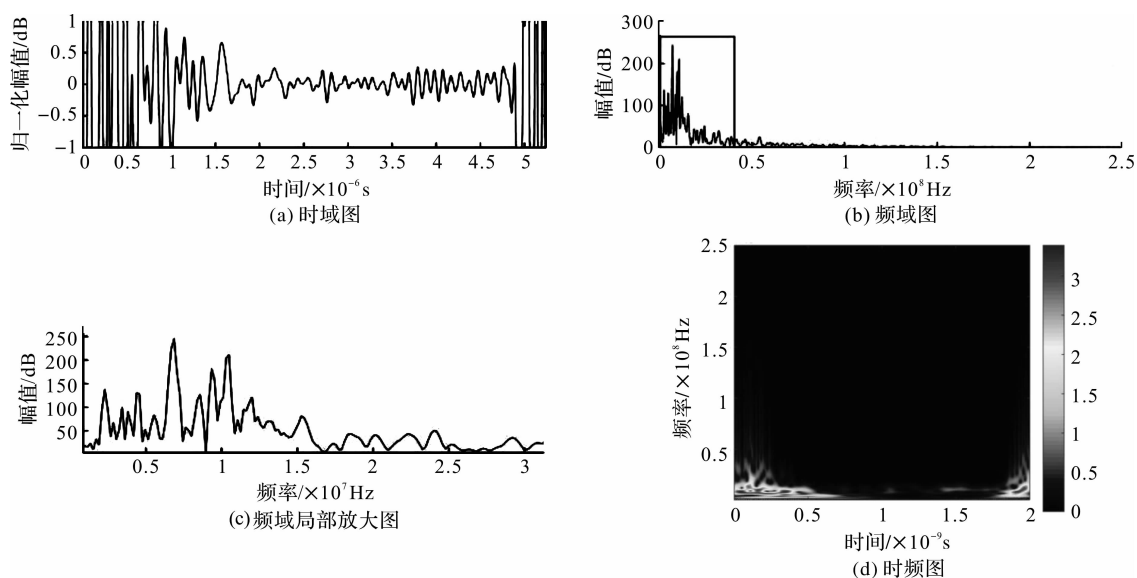


图4 无缺陷超声波信号变换图

Fig. 4 Transformation diagram of defect-free ultrasonic signal

间与频率的关系,前表面回波和底面回波的能量较强,而中间部分能量极弱,由此可判断无缺陷存在,与已知无缺陷情况一致。

3.3 超声波含缺陷信号的分析

已知铝合金轮毂含有一处气孔人工铸造缺陷,利用 MATLAB 对超声波时域信号进行傅里叶变换和小波时频变换,结果如图 5 所示。将图 5 与图 4 进行对比可知,图 5(a)中,前表面回波和底面回波之间有明显的回波,而且幅值相对较大;由图 5(c)可知,缺陷回波信号的主频为 5.9×10^6 Hz,有向低频漂移的情况出现,幅值也有略微的下降;图 5(d)可以更直观地看出中间有幅值较大的回波信号,标记 1 处颜色较深,表明能量相对较强,说明此处有尺寸较大的缺陷存在,缺陷 1 声波从 $t_1 = 0.7 \times 10^{-9}$ s 时开始在试件中传播,到达 $t'_1 = 0.77 \times 10^{-9}$ s 时结束,然后根据超声波在铝合金轮毂内的传播速度就可以确定缺陷 1 的位置,即缺陷深 $h = vt_1/2$, $v = 6\,400$ m/s,通过 $L_1 = v(t'_1 - t_1)/2$ 计算出缺陷 1 的大小;标记 2 处颜色相对较弱,说明此处有较小缺陷存在,缺陷 2 出现在 $t_2 = 1.5 \times 10^{-9}$ s,到达 $t'_2 = 1.6 \times 10^{-9}$ s 时结束,然后根据超声波在铝合金轮毂内的传播速度就可以确定缺陷的位置,即缺陷深度 $h = vt_2/2$, $v = 6\,400$ m/s,通过 $L_2 = v(t'_2 - t_2)/2$ 计算出缺陷 2 的大小,得到结果与已知的缺陷特征相符。

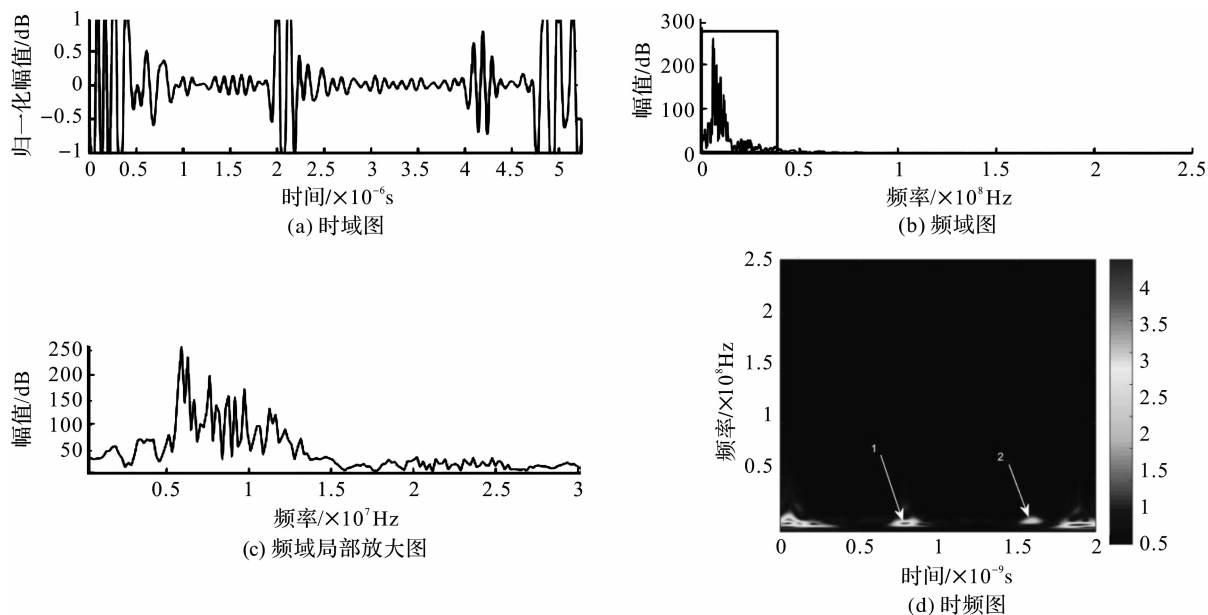


图 5 含缺陷超声波信号变换图

Fig. 5 Transformation diagram of ultrasonic signal with defects

4 超声波 C 图像的转换

在超声波 C 图像中,通过采集卡对铝合金轮毂内部超声波检测信号进行采集,采集到的超声波 A 型波信号 $s(t)$ 经过采样点数离散为 $s(z)$ 。z 为超声波采样数据点的序列,相当于超声波在铝合金轮毂传播的时间,即 $t = z/F_s$ 。通过 3.2 研究的小波变换去噪方法对原超声波 A 型波信号进行去噪,得到去噪后的超声波 A 型波信号,然后去噪之后的超声波 A 型波信号进行超声波 C 图像转换。设去噪后的超声波 A 型波信号为 $h(z)$,则 $z = F_s t$ 。去噪后的信号如图 6 所示。超声波 A 型波转换为超声伪彩图像的颜色,本文选用

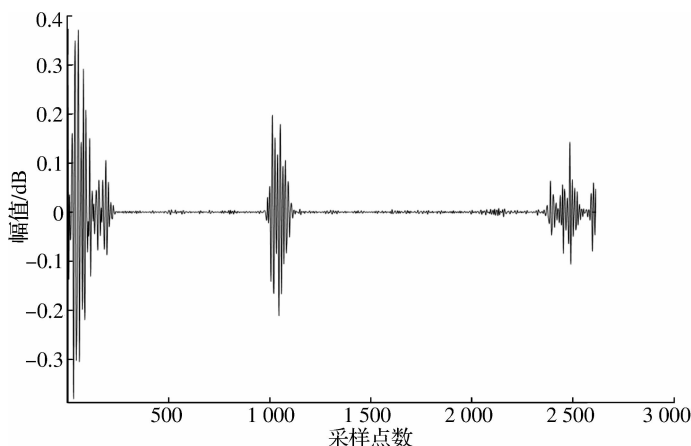


图 6 去噪后信号

Fig. 6 Denoised signal

RGB 三原色的比例,超声波 C 图像如图 7 所示,根据图 7 中各区域颜色的不同来判断缺陷是否存在,根据颜色块的大小可以直观地判断缺陷的大小,图 7 中标记处存在颜色块,据此可以判定该处为铝合金轮毂中存在的缺陷,由颜色块的大小可以观察出缺陷的大小。

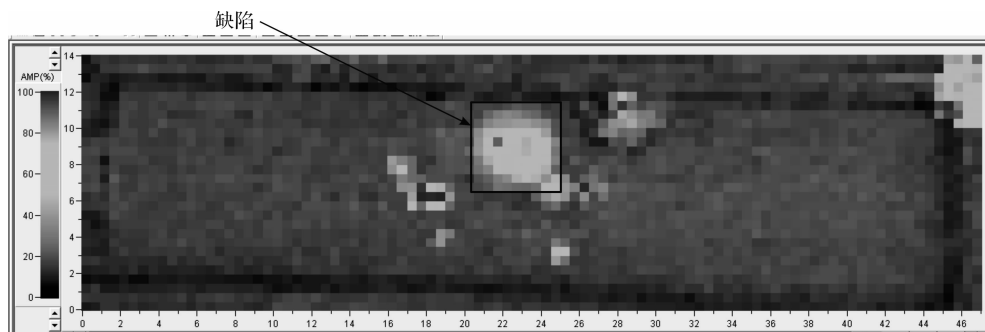


图 7 超声波 C 图像

Fig. 7 Ultrasonic C image

5 结 语

本研究针对铝合金轮毂内部缺陷检测的问题,设计了三自由度铝合金轮毂超声波检测系统。该系统可以有效地检测出铝合金轮毂中的缺陷特征,从而在一定程度上解决了人工检测存在不稳定、效率低、受外界干扰大的问题。试验中采用的频域分析和小波变换相结合的超声信号处理方法,弥补了短时傅里叶时频变换技术的局限,并采用超声波 C 图像的方法进一步直观地显示出缺陷。可见,我们设计的基于频谱分析和小波分析的超声波自动检测系统对铝合金轮毂铸造缺陷的检测是可行的。

参考文献:

- [1] 姚丹. 汽车铝合金轮毂铸造技术工艺应用研究[J]. 世界有色金属, 2018(4): 241.
- [2] 李丰. 汽车铝合金轮毂的成型工艺[J]. 科学技术创新, 2018(11): 168.
- [3] 李玉升. 低压铸造铝合金轮毂模具设计优化[J]. 汽车零部件, 2018(12): 72.
- [4] 余洋. 铝合金汽车轮毂铸造工艺研究[J]. 民营科技, 2018(7): 17.
- [5] 贾晓飞, 王志峰, 赵维民, 等. 低压铸造铝合金轮毂内部缺陷分析及改进措施研究[J]. 铸造, 2010, 59(12): 1298.
- [6] 唐计龙. 铝合金轮毂低压铸造工艺的数值模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [7] 刘军, 陶维道. X 射线数字成像技术在铸造铝合金轮毂检测中的应用[J]. 无损探伤, 2017, 41(3): 42.
- [8] 吕金旗. 低压铸造轮毂缺陷 X 射线检测系统的原理及应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(2): 155.
- [9] 楼国红, 张俊生, 郭晋秦. 铝合金轮毂内部缺陷的定量分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(7): 787.
- [10] 赵艳春, 朱晓艳, 郭北涛. 铝合金厚壁管类工件水浸超检测系统的研制[J]. 机械工程师, 2017(8): 8.
- [11] 周正干, 李文涛, 李洋, 等. 相控阵超声水浸 C 扫描自动检测系统的研制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 28.
- [12] 夏沙, 徐春光, 赵春玉, 等. 车辆轮毂缺陷的超声自动化扫查[J]. 无损检测, 2013, 35(7): 21.
- [13] 孙继华, 赵扬, 南钢洋, 等. 钢轨轨腰缺陷激光-电磁超声检测及信号处理[J]. 激光杂志, 2017, 38(12): 22.
- [14] 田明明, 解社娟, 韩捷, 等. 基于小波分析的脉冲涡流/电磁超声复合无损检测方法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(16): 1925.
- [15] ROMANISHIN R I, ROMANISHIN I M. Processing of backscattered signal in ultrasonic testing[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2018, 54(6): 394.
- [16] 冯志红. 大型锻件超声检测方法 & 信号处理算法研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2016.