

镁合金涂层质量非线性超声检测与信号处理^{*}

颜丙生¹, 黄致远¹, 张柏²

(1.河南工业大学机电工程学院 郑州,450001)

(2.许昌烟草机械有限责任公司 许昌,461143)

摘要 针对常规方法难以检测镁合金涂层缺陷的问题,提出采用非线性超声检测技术对含有不同程度微缺陷的镁合金聚乳酸涂层试件进行检测。同时,由于镁合金涂层试件较小,可容纳的正弦脉冲周期数较少,导致超声非线性系数 β 的计算易受到噪声和频率偏移的干扰而产生较大误差,提出采用截断-最小二乘法(truncation least square method,简称TC-LS)等4种信号处理方法对涂层试件检测信号进行处理,并进行仿真试验研究。结果表明:TC-LS计算 β 的误差在5%以内,在抗噪能力和处理少周期数信号能力上比其他3种方法更强、精度更高。对实测信号研究分析表明,TC-LS比离散傅里叶变换(discrete Fourier transform,简称DFT)得到的 β 值趋势变化更加明显,能够更有效计算 β 值,为非线性超声信号处理提供了一种新方法。

关键词 镁合金;非线性超声检测;聚乳酸涂层;最小二乘法;信号处理

中图分类号 TH878;TB551;TB31

引言

镁合金作为修复人体骨缺损的医用材料,具有良好的应用前景^[1-2]。然而,在植入材料领域,镁合金骨面临过快腐蚀的问题^[3]。目前,生物活性陶瓷、壳聚糖和聚乳酸等材料被广泛用作涂层材料。其中,由于具有机械强度适中、疏水性好、成本低廉等优点,聚乳酸材料在骨组织工程领域得到广泛应用^[4-5]。然而,涂层在生长过程中不可避免地产生表面褶皱、气泡等^[6]微缺陷。这些缺陷微小且扁平,通过肉眼或常规检测方法难以发现,严重影响涂层的耐腐蚀性,导致涂层无法达到预期的耐腐蚀效果。因此,评估镁合金聚乳酸涂层的耐腐蚀性和使用寿命具有重要意义。

非线性超声对材料内部微观结构变化较为敏感,单频超声波在材料内部传播时,会与材料内部微结构相互作用而发生畸变,产生二次谐波。通过测量二次谐波并计算超声非线性系数 β ,可表征微结构变化程度,进而实现材料的无损评价^[7-9]。非线性超声检测信号中二次谐波能量微弱,容易受到系统非线性和外界噪声干扰。另一方面,由于频谱中基波主瓣较宽,其旁瓣会干扰二次谐波分量,导致难以提取二次谐波幅值,造成 β 计算不精确,这些问题在处理少周期数信号时更为严重。

蔡智超等^[10]采用Duffing混沌系统定量评估金属疲劳程度,利用Lyapunov指数对早期疲劳进行损伤表征,证明了Lyapunov指数对疲劳损伤信号具有较高的灵敏度和抗噪性能。江念等^[11]将脉冲反转技术和小波变换用于处理非线性超声信号,有效降低了噪声的干扰,并提取出频率纯净的二次谐波。牛进瑞等^[12]对比了傅里叶变换法和直接拟合最小二乘法(least square method,简称LS),分析了傅里叶变换的误差主要来源于频率泄露问题,验证了LS在非线性超声信号处理中的可行性,同时指出频率偏移对计算精度会产生影响。Scott等^[13]针对少周期数非线性超声检测接收信号中二次谐波的特点,对比了DFT和LS等5种信号处理方法,认为LS处理少周期数的接收信号具有更高精度。然而,上述研究并未考虑频率偏移现象^[14]对LS的影响。一般的镁合金涂层试件尺寸较小,在进行非线性超声检测时所能容纳的超声检测信号周期数有限,因此亟待进一步研究如何利用LS更加精确地计算检测信号中的 β 值。

本研究采用非线性超声检测技术对含有不同程度微缺陷的聚乳酸涂层镁合金试件进行检测,利用LS和TC-LS等4种方法处理仿真信号和实测信号,研究所提方法在频率偏移现象和少周期数信号中的

* 国家自然科学基金联合基金资助项目(U1604134);河南省科技攻关资助项目(212102210327);河南工业大学创新基金支持计划专项资助项目(2020ZKJCJ28)

收稿日期:2023-06-14;修回日期:2023-08-11

抗噪性能和准确性。探讨非线性超声检测技术在镁合金聚乳酸涂层微缺陷检测中的可行性,以及所提信号处理方法的优越性。

1 理论基础

1.1 非线性超声检测理论

单一频率的超声波在弹性固体中传播时,与介质内部的微缺陷产生非线性作用,引发超声波“畸变”,从而产生包括二次谐波在内的高次谐波。Breazeale等^[15]从连续介质出发,建立了固体介质一维纵波非线性波动方程,即

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = K_2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (3K_2 + K_3) \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

其中: ρ_0 为材料密度; K_2 、 K_3 分别为二阶和三阶弹性常数; u 为在 t 时的振幅; x 为超声波传播距离。

定义超声非线性系数为

$$\beta = -\frac{3K_2 + K_3}{K_2} \quad (2)$$

得到超声非线性系数 β 为

$$\beta = \frac{8}{k^2 x} \frac{A_2}{A_1^2} \quad (3)$$

其中: A_1 、 A_2 分别为基波幅值、二次谐波幅值; k 为发射的脉冲超声波波数。

试验中激励信号的波数和试件长度一般为固定值,因此只需对 A_1 、 A_2 进行测量就可确定 β 。为方便计算,通常采用相对超声非线性系数 $\beta \sim \frac{A_2}{A_1^2}$ 表征超声非线性系数变化。

1.2 LS原理及改进方法

在进行非线性超声检测时,激励信号和接收信号中的基波、二次谐波及高次谐波均以正弦波形式存在。因此,可假设基波关于时间 t 的表达式为

$$x_1(t) = A_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) \quad (4)$$

二次谐波关于时间 t 的表达式为

$$x_2(t) = A_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2) \quad (5)$$

其中: φ_1 为基波相位; φ_2 为二次谐波相位。

式(4)、(5)可转化为

$$x_1(t) = b_1 \cos(2\pi f_1 t) + b_2 \sin(2\pi f_1 t) \quad (6)$$

$$x_2(t) = b_3 \cos(2\pi f_2 t) + b_4 \sin(2\pi f_2 t) \quad (7)$$

其中: b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 为常量。

建立仿真信号的模型为

$$S = b_1 \cos(2\pi f_1 t) + b_2 \sin(2\pi f_1 t) + b_3 \cos(2\pi f_2 t) + b_4 \sin(2\pi f_2 t) + b_5 \quad (8)$$

其中: b_5 为常量,用以解释信号中可能出现的静态位移等波动问题。

式(8)可用矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} S[1] \\ S[2] \\ \vdots \\ S[N] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(2\pi f_1 t) \\ \sin(2\pi f_1 t) \\ \cos(2\pi f_2 t) \\ \sin(2\pi f_2 t) \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

其中:向量 S 为接收信号数据; N 为信号的采样点数。

使用LS拟合,通过计算系数矩阵 b_N ,可计算出 A_1 、 A_2 ,即

$$A_1 = \sqrt{b_1^2 + b_2^2} \quad (10)$$

$$A_2 = \sqrt{b_3^2 + b_4^2} \quad (11)$$

LS在处理接收信号之前,需要输入激励信号基波和二次谐波的频率作为模型参数。该过程认为接收信号与激励信号的基波主频一致,并未发生变化。在实际测试中,由于材料内部存在微缺陷,以及试验系统本身的影响,导致超声波在传播的过程中发生畸变。接收信号点数与激励信号点数不一致,不满足采样频率与基频比值成整数倍的要求,接收信号在进行傅里叶变换时,各频率成分谱线将发生偏移。接收信号时域波形及频谱如图1所示。由图可知,原本应该在2 MHz和4 MHz处的谱线偏移到了2.062 MHz和3.917 MHz处。

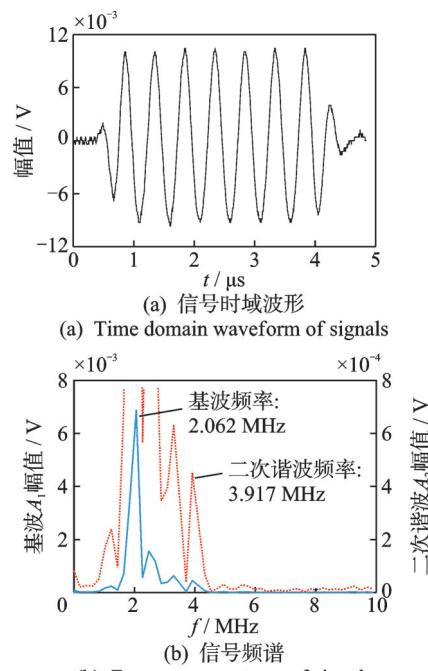


图1 接收信号时域波形及频谱

Fig.1 Time domain waveform and frequency spectrum of received signals

为避免频率偏移现象对LS计算精度造成影响,在LS的基础上,提出TC-LS。首先,将接收信号数据进行截断处理,使数据点数满足采样频率与基波频率比值的整数倍,使接收信号的基波和二次谐波频率回归目标值,从而避免频谱发生频率偏移;其次,将截断后的接收信号数据代入LS模型,利用LS进行拟合得到基波与二次谐波的幅值,进而计算得到 β 。

2 数值仿真

2.1 数值模拟信号生成

与实际测试信号相比,数值模拟信号具有确定的频率和幅值等参数。对数值模拟信号进行分析处理时,将得到的结果与预设值进行对比,可直观了解该信号处理方法的可行性和准确性,并对信号处理方法进行评价。仿真信号生成如图2所示。数值模拟信号由基频信号和二次谐波2种正弦信号合成,并添加噪声。

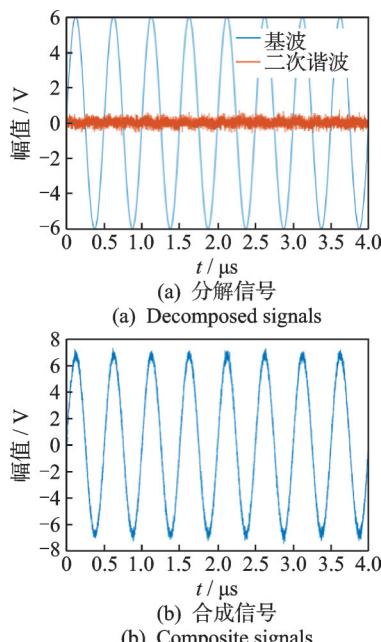


图2 仿真信号生成

Fig.2 Simulation signals generation

利用Matlab软件生成仿真信号,其表达式为

$$X = A_1 \sin(2\pi f_1 t) + (A_2 \sin(2\pi f_2 t) + \text{noise}) \quad (12)$$

其中: A_1 、 A_2 分别为基波和二次谐波幅值, f_1 、 f_2 分别为基波和二次谐波频率,noise为随机白噪声。

为使模拟信号更接近本研究中的实际接收信号,设 $f_1=2$ MHz、 $f_2=4$ MHz、 $A_1=6$ 、 $A_2=0.06$,则该模拟信号的 $\beta=1.667 \times 10^{-3}$ 。噪声添加在二次谐波上,模拟实际试验中信号所受到的干扰,采样频

率设为2 GHz。同时,为模拟频率偏移现象,信号每周期生成1 001个点。

为进一步研究信号周期数和噪声对不同的信号处理方法的影响,在对频率偏移信号进行处理时,分别生成2组信号:①固定周期数,即cycles=8,信噪比(signal to noise ratio,简称SNR)由8 dB依次增加到20 dB,共13个信号样本;②SNR=15 dB,周期数从3依次增加到12,共10个信号样本。

2.2 SNR 的影响

在不同试验条件下,系统噪声会受到测量条件的影响而变得更高或更低。因此,在数值模拟的合成信号中,首先研究噪声对4种信号处理方法的影响。由于二次谐波振幅较小,比基波幅值受到噪声的影响更大,因此通过计算二次谐波幅值的SNR来确定系统噪声水平。经过计算,实测信号的SNR在10~18 dB的范围内。为验证所提方法在范围内和范围附近是否具有更高的计算精度,将模拟信号的SNR设置为8~20 dB,共13个信号样本。

SNR对4种信号处理方法的影响如图3所示。图中红色虚线表示模拟信号的相对超声非线性系数 β 值,2条红色实线之间的区域表示该值的±5%以内的误差范围。DFT和DFT与LS相结合的方法(DFT-LS)处理得到的结果并不在控制误差范围内,表明DFT和DFT-LS易受噪声影响而导致计算精度不足。当SNR大于9 dB时,LS和TC-LS方法的精度均达到±5%。随着SNR的增加,LS和TC-LS方法的精度逐渐提高,得到的 β 值也趋于确定值0.001 67。虽然4种方法均随SNR的增大而趋于收敛,但DFT和DFT-LS方法的计算结果与预设的误差范围有着较大的差距。

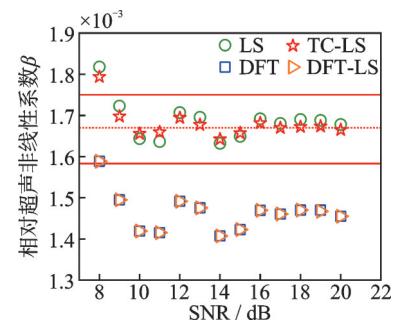


图3 SNR对4种信号处理方法的影响

Fig.3 Influence of SNR on 4 signal processing methods

表1为不同SNR下4种方法的误差。采用DFT-LS和DFT方法计算的误差几乎相同,误差值基本在10%以上。相较于DFT-LS和DFT,LS和TC-LS有着更小的计算误差,在计算不同SNR下的信号时优势更大。

表1 不同SNR下4种方法的误差

Tab.1 Errors of 4 methods under different SNR %

SNR	DFT	DFT-LS	LS	TC-LS
8	4.619 1	4.584 2	9.071 7	7.624 9
9	10.018 0	10.005 1	3.376 3	1.867 7
10	14.817 0	14.806 3	1.385 8	0.660 1
11	14.832 5	14.846 7	1.810 5	0.432 1
12	10.617 9	10.587 4	2.412 1	1.660 8
13	11.217 8	11.159 4	1.731 6	0.637 8
14	15.416 9	15.401 0	2.070 0	1.452 8
15	14.817 0	14.811 5	1.056 3	0.574 7
16	11.817 6	11.812 3	1.518 9	0.897 8
17	12.412 5	12.312 0	0.832 3	0.190 2
18	11.817 6	11.812 3	1.406 1	0.342 7
19	11.817 6	11.812 3	1.282 6	0.419 1
20	12.417 5	12.401 0	0.679 2	0.106 8

表2为不同SNR下LS和TC-LS的误差比较。LS与TC-LS得到的结果与确定值之间的误差随着SNR的增加而逐渐减小,但TC-LS的误差均比LS更小。当SNR=20 dB时,TC-LS的误差仅有0.106 8%,比LS的误差小0.572 4%,表明TC-LS在结果计算精度上比LS更高。一方面,说明LS在直接处理少周期数频率偏移信号时计算精度会有所降低;另一方面,说明TC-LS能够补偿这种影响,提高计算的精度,且TC-LS在抗噪性能上要优于LS。

表2 不同SNR下LS和TC-LS的误差比较

Tab.2 Comparison of errors between LS and TC-LS under different SNR

SNR	LS	TC-LS	误差减小值
8	9.071 7	7.624 9	1.446 9
9	3.376 3	1.867 7	1.508 6
10	1.385 8	0.660 1	0.725 7
11	1.810 5	0.432 1	1.378 4
12	2.412 1	1.660 8	0.751 2
13	1.731 6	0.637 8	1.093 8
14	2.070 0	1.452 8	0.617 2
15	1.056 3	0.574 7	0.481 7
16	1.518 9	0.897 8	0.621 1
17	0.832 3	0.190 2	0.642 1
18	1.406 1	0.342 7	1.063 4
19	1.282 6	0.419 1	0.863 4
20	0.679 2	0.106 8	0.572 4

2.3 周期数的影响

由于本研究中试件超声检测信号的周期数较少,在研究4种方法对少周期数频率偏移合成信号

的处理能力时,将模拟信号周期设置为3~12个整周期,共10个模拟信号样本,并将SNR设置为固定值15 dB。周期数对4种信号处理方法的影响如图4所示。DFT和DFT-LS在处理少周期数信号时误差较大,其主要原因是随着信号长度在时域缩短,频谱在频域逐渐变宽,这种固有特性导致基频的旁瓣干扰了二次谐波的振幅。

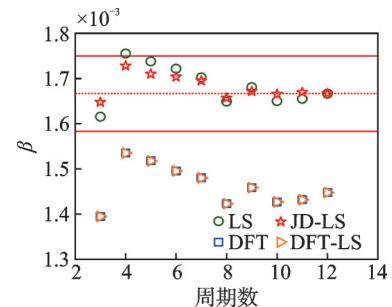


图4 周期数对4种信号处理方法的影响

Fig.4 Influence of cycles on 4 signal processing methods

表3为不同周期数下4种方法的计算误差。与LS和TC-LS相比,使用DFT和DFT-LS方法计算的不同周期下模拟信号 β 值误差较大,而使用LS和TC-LS方法计算的误差均有较大改善,这说明在计算少周期数信号的 β 值时,采用LS和TC-LS方法更加准确。由于无需对信号进行频谱转化,避免了DFT在处理少周期数信号时自身局限性的影响,LS和TC-LS可准确提取基波和二次谐波幅值,得到的 β 值误差在±5%以内。在低周期处,LS和TC-LS处理结果的精度要明显优于DFT和DFT-LS。

表3 不同周期数下4种方法的计算误差

Tab.3 Calculation errors of 4 methods under different cycles

周期数	DFT	DFT-LS	LS	TC-LS
3	16.616 7	16.557 8	3.072 1	1.155 6
4	7.618 5	7.535 4	5.308 3	3.683 4
5	8.818 2	8.801 2	4.281 4	2.599 9
6	10.018 0	10.002 1	3.306 8	2.204 7
7	11.217 8	11.205 7	2.137 5	1.698 3
8	14.817 0	14.801 5	1.056 3	0.574 7
9	12.417 5	12.404 3	0.853 8	0.288 1
10	14.217 2	14.210 9	0.991 1	0.084 9
11	14.024 2	14.013 1	0.695 6	0.170 8
12	13.017 4	13.012 4	0.018 8	0.021 7

表4为不同周期数下LS和TC-LS误差比较。在相同周期数下,TC-LS的误差均小于LS。这说明在一定范围内,对于处理少周期数频率偏移信号,LS方法的精度会受到影响,而TC-LS方法能够提高这类信号的 β 值计算精度。

表4 不同周期数下LS和TC-LS误差比较

Tab.4 Comparison of errors between LS and TC-LS under different periods

周期数	LS	TC-LS	误差减小值	%
3	3.072 1	1.155 6	1.916 5	
4	5.308 3	3.683 4	1.624 9	
5	4.281 4	2.599 9	1.681 5	
6	3.306 8	2.204 7	1.102 1	
7	2.137 5	1.698 3	0.439 1	
8	1.056 3	0.574 7	0.481 7	
9	0.853 8	0.288 1	0.565 7	
10	0.991 1	0.084 9	0.906 2	
11	0.695 6	0.170 8	0.524 8	
12	0.018 8	0.021 7	-0.002 9	

3 非线性超声检测试验研究

3.1 试件制作

试件材料为AZ31型镁合金棒材。首先,将棒材用机加工(线切割)切成若干段15 mm长的试件,用金相砂纸对试件上下2个端面逐级打磨并抛光,依次用丙酮、无水乙醇清洗打磨好的金属基底,再用去离子水清洗数次后烘干备用;其次,将处理好的金属基底一端浸没在聚乳酸浸涂液液面以下8~10 mm,静置10 s后缓慢向上提出液面,迅速用干燥气流作用该金属端面数秒(从6 s依次增加到15 s),使聚乳酸因过快凝结产生不同程度的生长微缺陷;最后,室温下静置1 h后再浸涂该端面2次,使聚乳酸正常凝结,完成浸涂的试件移至通风处静置48 h。

共制备10个试件,所有试件金属基底部分均由一根直径为16 mm的镁合金棒材截取,各试件的打磨、涂层制备均同时进行,并使用相同仪器和设备,以减少干扰。制作的试件长度为14.5 mm、直径为16 mm。聚乳酸涂层镁合金试件及其尺寸如图5所示。



图5 聚乳酸涂层镁合金试件及其尺寸

Fig.5 Polylactic acid coated magnesium alloy specimen and its dimensions

3.2 检测系统

图6为镁合金聚乳酸涂层试件的非线性超声检测系统。信号发生器发射周期数为9、幅值为

300 mV的正弦脉冲信号,经功率放大器放大后通过截止频率为3 MHz的RETIC型高能低通滤波器。信号通过滤波器后,激励中心频率为2.25 MHz的纵波直探头发射超声波,超声波从试件不含涂层的一端沿轴向传播至另一端。中心频率为5 MHz的纵波直探头在试件涂层端接收信号,由示波器采集接收到的信号,最后由计算机进行处理。接收探头使用夹紧装置固定,且可随导轨上下移动,发射探头固定在已定位的压力传感器上。试验中所用耦合剂为工业超声耦合剂,试验时沿试件轴线方向进行检测。

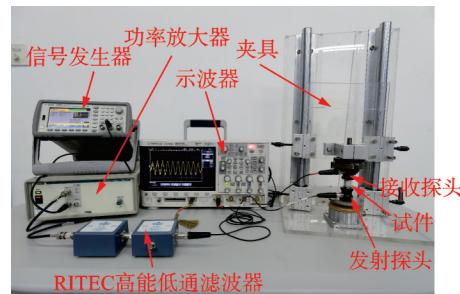


图6 非线性超声检测系统

Fig.6 Nonlinear ultrasonic testing system

图7为非线性超声检测接收信号的时域波形与频谱。由于采用纵波检测和超声换能器,且试件较薄,在接收信号的时域图中,前3个周期和后1个周期为瞬态,红色圆点之间的5个周期为稳态循环,也称为有效循环^[13]。在进行信号处理时,取5个稳定周期进行傅里叶变换,以减少其他因素对超声检测

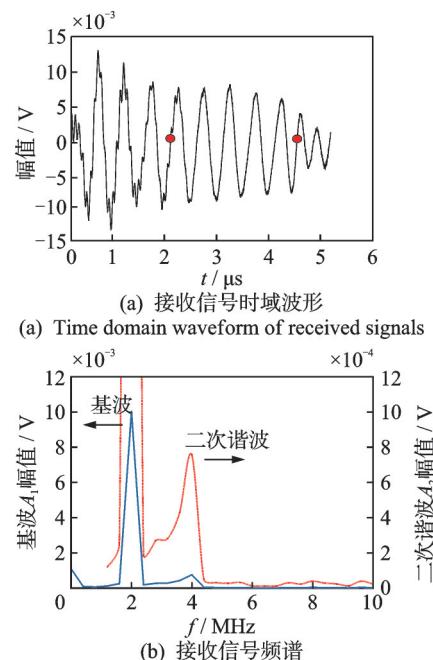


图7 非线性超声检测接收信号的时域波形与频谱

Fig.7 Time domain waveform and frequency spectrum of received signals obtained by nonlinear ultrasonic detection

结果的影响。经傅里叶变换后,从频谱中可观察到基波与二次谐波,二者幅值相差1个数量级。

3.3 结果与分析

采用DFT和TC-LS对10个试件的非线性超声检测接收信号进行处理并计算相应 β 值。首先,使用DFT处理10个接收信号, β 随干燥气流作用时间的变化如图8所示。 β 随着气流处理时间的增加呈上升趋势,这是由于超声波通过微小气泡时“拍打效应”发生“畸变”,产生了包括二次谐波在内的高次谐波。当处理时间逐渐增加、聚乳酸突起数量增多时,可产生拍打效应的气泡也随之增多,产生的二次谐波幅值将越大, β 值也随之变大。

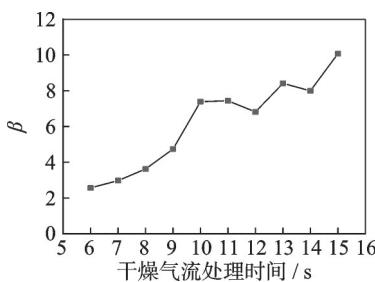


图8 β 随干燥气流作用时间的变化

Fig.8 Variation of β with drying air action time

利用DFT和TC-LS对10个信号重新进行处理,计算信号在不同方法下的 β 。2种信号处理方法得到的基波和二次谐波如图9所示。由图可知,TC-LS提取基波和二次谐波的能力要明显好于

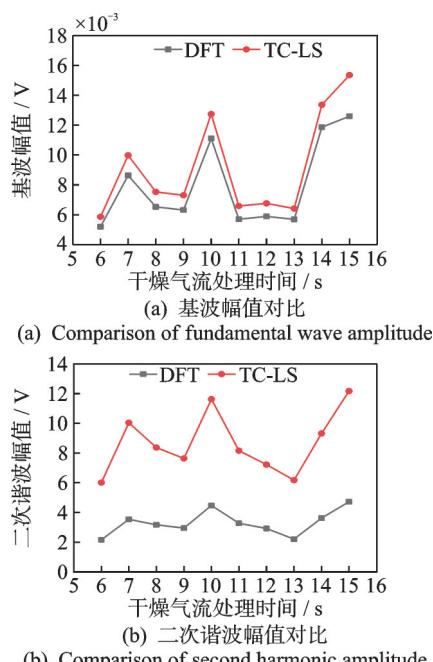


图9 2种信号处理方法得到的基波和二次谐波

Fig.9 Fundamental wave and second harmonic obtained by 2 signal processing methods

DFT。这是由于实测信号比模拟信号成分更为复杂、噪声更大,叠加激励信号周期数少以及频率偏移的影响,导致DFT的精度不高。TC-LS的抗噪能力和处理少周期数信号的能力较好,尤其是易受噪声干扰的二次谐波成分。相较于DFT,TC-LS可大幅提高提取的幅值。这对于提取本就微弱的二次谐波来说十分有利,可有效计算真实的 β 值。

根据提取到的基波和二次谐波幅值,2种方法处理得到的 β 值对比如图10所示。2种方法计算的 β 值趋势相同,而TC-LS的结果趋势更加明显,再次证明所提出的TC-LS方法可处理少周期数信号,且能减小频率偏移现象对特定频率成分幅值提取的影响,同时具有较强的抗噪能力。

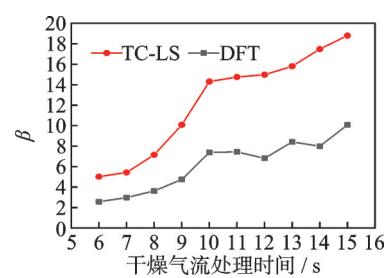


图10 2种方法处理得到的 β 值对比

Fig.10 Comparison of β obtained by 2 methods

4 结论

1) 根据提出的TC-LS信号处理方法,利用仿真模拟信号研究了4种信号处理方法。与其他方法相比,TC-LS方法计算误差可控制在5%以内,在抗噪能力和处理少周期数信号的能力上更强、精度更高。该方法适用于低SNR和少周期数特征的非线性超声信号的 β 值计算,但SNR不能过低,否则会降低TC-LS的计算精度。

2) 利用TC-LS方法和DFT对薄试件超声检测信号进行了试验分析。TC-LS方法提取的基波和二次谐波幅值明显高于DFT,得到的 β 值趋势变化更加明显。TC-LS可较好地处理少周期数信号,并能够减小频率偏移现象对特定频率成分幅值提取的影响,抗噪能力较强。TC-LS方法适用于处理长度较小的薄试件检测信号,且具有较高的精度。

3) 通过对镁合金聚乳酸涂层非线性超声检测及信号处理的结果进行分析,超声非线性系数 β 对聚乳酸涂层缺陷变化较为敏感,说明采用非线性超声检测技术评估镁合金聚乳酸涂层的耐腐蚀性是有效的。

参 考 文 献

- [1] RAZAVI M, FATHI M, SAVABI O, et al. In vivo

- study of nanostructured diopside ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) coating on magnesium alloy as biodegradable orthopedic implants[J]. Applied Surface Science, 2014, 313: 60-66.
- [2] SHI P, NIU B, E S, et al. Preparation and characterization of PLA coating and PLA/MAO composite coatings on AZ31 magnesium alloy for improvement of corrosion resistance[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 262(12): 26-32.
- [3] 崔蓝月, 薛奎, 李硕琦, 等. 可降解骨植入镁合金表面抗菌涂层研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 3071-3092.
- CUI Lanyue, XUE Kui, LI Shuoqi, et al. Research progress of antibacterial coating on surface of biodegradable bone implant magnesium alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31 (11) : 3071-3092.(in Chinese)
- [4] LASPRILLA A J R, MARTINEZ G A R, LUNELLI B H, et al. Poly-lactic acid synthesis for application in biomedical devices: a review[J]. Biotechnology Advances, 2012, 30(1): 321-328.
- [5] ZHANG L, PEI J, WANG H D, et al. Facile preparation of poly (lactic acid)/brushite bilayer coating on biodegradable magnesium alloys with multiple functionalities for orthopedic application[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9 (11) : 9437-9448.
- [6] ALIG I, TADJBACH S, KRÜGER P, et al. Characterization of coating systems by scanning acoustic microscopy: debonding, blistering and surface topology [J]. Progress in Organic Coatings, 2009, 64 (2/3) : 112-119.
- [7] 李萍, 陈雷, 王腾腾, 等. 304不锈钢点蚀损伤的非线性超声表征[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(2) : 375-381.
- LI Ping, CHEN Lei, WANG Tengteng, et al. Nonlinear ultrasonic characterization of pitting corrosion damage of 304 stainless steel[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(2): 375-381.(in Chinese)
- [8] 吴斌, 颜丙生. 非线性超声检测镁合金疲劳的仿真和试验[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(1): 96-100.
- WU Bin, YAN Bingsheng. Simulation and test of nonlinear ultrasonic detection of magnesium alloy fatigue [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2012, 32(1): 96-100.(in Chinese)
- [9] YUN H G, RAYHANA R, PANT S, et al. Nonlinear ultrasonic testing and data analytics for damage characterization: a review[J]. Measurement, 2021, 186: 110155.
- [10] 蔡智超, 李豪, 倪惠发, 等. 电磁超声非线性效应表征的Lyapunov指数分析方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10): 223-232.
- CAI Zhichao, LI Hao, NI Huifa, et al. Electromagnetic ultrasonic nonlinear effects for the characterization of Lyapunov exponential analytical method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43 (10) : 223-232.(in Chinese)
- [11] 江念, 王召巴, 陈友兴. 脉冲反转和小波变换在非线性超声检测中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2015(12): 97-99.
- JIANG Nian, WANG Zhaoba, CHEN Youxing. Application of pulse-inversion technique and wavelet transform for nonlinear ultrasonic nondestructive testing [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015 (12) : 97-99. (in Chinese)
- [12] 牛进瑞, 陈小佳. 混凝土非线性超声信号处理方法比较[J]. 工程与建设, 2020, 34(5): 996-998, 1007.
- NIU Jinrui, CHEN Xiaojia. Comparison of nonlinear ultrasonic signal processing methods for concrete[J]. Engineering and Construction, 2019, 34 (5) : 996-998, 1007.(in Chinese)
- [13] SCOTT K, KIM J Y, JACOBS L J. Signal processing methods for second harmonic generation in thin specimens[J]. NDT & E International, 2018, 95: 57-64.
- [14] 颜丙生, 赵俊杰, 汤宝平, 等. 频率分辨率对超声非线性系数的影响及修正方法[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(5): 783-788.
- YAN Bingsheng, ZHAO Junjie, TANG Baoping, et al. Influence of spectral resolution on ultrasonic nonlinear parameter and its correction method [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44 (5) : 783-788.(in Chinese)
- [15] BREAZEALE M A, THOMPSON D O. Finite-amplitude ultrasonic waves in aluminum[J]. Applied Physics Letters, 1963, 3: 77-78.



第一作者简介: 颜丙生, 男, 1978年1月生, 博士、副教授。主要研究方向为动态测试与机械故障诊断。曾发表《Time domain extraction method of ultrasonic nonlinear coefficient》(《NDT & E International》2025, Vol.156)等论文。

E-mail: yanbingsheng@163.com