

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2022.104

考虑表面粗糙度的接触式超声衰减系数校正方法

刘华强¹, 彭先敏², 章贵川², 付统¹, 尹爱军¹

(1. 重庆大学机械与运载工程学院, 重庆 400044; 2. 中国空气动力研究与发展中心低速所, 四川 绵阳 621000)

摘要:材料的表面质量会显著影响超声衰减系数的准确测量。根据表面粗糙度对垂直入射的超声波束传播的影响, 提出了考虑表面粗糙度的接触式超声衰减系数校正方法。首先基于未耦合时粗糙界面反射系数校正理论和光滑界面耦合时的反射系数计算公式, 推导出耦合时粗糙界面的反射系数表达式。在此基础上结合衰减系数计算公式提出了包含粗糙度信息的接触式超声衰减系数校正方法。最后, 制备了不同表面粗糙度的 45 钢和 304 不锈钢柱体试件, 搭建了衰减系数超声测量平台, 通过实验分析了表面粗糙度对信号时域和频域的影响, 验证了提出的校正方法的有效性和实用性。实验结果表明, 提出的衰减模型能有效补偿粗糙度引起的超声背散射信号衰减, 透射法相对测量误差在 6% 以内。

关键词:粗糙度; 超声衰减系数; 反射系数; 接触式超声换能器

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)05-021-10

Method of contact ultrasonic-attenuation coefficient correction considering surface roughness

LIU Huaqiang¹, PENG Xianmin², ZHANG Guichuan², FU Tong¹, YIN Aijun¹

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. The Low Speed Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, P. R. China)

Abstract: The surface quality of material significantly affects the accurate measurement of the ultrasonic attenuation coefficient. According to the influence of surface roughness on the propagation of a vertical incident ultrasonic beam, a method of contact ultrasonic-attenuation coefficient correction considering surface roughness was proposed. Firstly, based on the correction theory of reflection coefficient of rough interface in the case of uncoupling and the calculation formula of reflection coefficient of smooth interface in the case of coupling, the formula of reflection coefficient of rough interface in the case of coupling was derived. Then, a method of contact ultrasonic attenuation coefficient correction including roughness information based on the formula of attenuation coefficient was proposed. Finally, cylinder specimens of 45 steel and 304 stainless steel with different surface roughness were prepared, and the ultrasonic measurement platform of attenuation coefficient was established. The

收稿日期: 2021-07-26 网络出版日期: 2022-02-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFB1703600); 重庆市科技重大主题专项(cstc2018jszx-cyztzxX0032)。

Supported by the National Key R & D Program of China (2019YFB1703600), and the Major Projects of Science and Technology of Chongqing (cstc2018jszx-cyztzxX0032).

作者简介: 刘华强(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事超声无损检测、应用方向研究, (E-mail)Huaqiang_Liu@163.com。

通信作者: 彭先敏, 男, 高级工程师, 主要从事测量、控制方向研究, (E-mail)P735826670@163.com。

influence of surface roughness on signal time domain and frequency domain was investigated to verify the validity and practicability of the proposed correction method. Experimental results show that the proposed attenuation model can effectively compensate the attenuation of ultrasonic backscattered signal caused by roughness, and the relative measurement error of transmission method is less than 6%.

Keywords: roughness; ultrasonic attenuation coefficient; reflection coefficient; contact ultrasonic transducer

超声衰减系数作为金属材料的基本声学参数之一,被广泛应用于材料参数的无损检测,例如表征材料的孔隙度、晶粒尺寸、晶粒尺寸分布及疲劳等参数信息^[1-4]。所以,超声衰减系数的准确测量具有非常重要的意义。

目前常见的超声衰减系数测量方法包括水浸法^[5]和接触法^[6]。其中水浸法可实现完美的固-液耦合,进而获取稳定的测量信号,因而受到了广泛研究与发展。Guan等^[7]利用水浸式超声检测技术实现了对大型环类锻件近表面缺陷的定量检测。Zhang等^[8]和Li等^[9]利用水浸式测量法对不同曲率和表面质量的金属材料的微观尺寸进行了评估,提出了不同情况下的超声衰减评价模型。虽然采用水浸法可以获得较为稳定的结果,但测量时必须将被测试件完全浸没在液体中,故其在实际应用中必然受到被测物体及使用环境的制约。接触法对试件的测量状态无特殊要求,因此不存在上述问题。但是,接触法的耦合状况主要由超声换能器压紧力、耦合剂和表面质量等因素共同决定,具有较大的离散性。针对这一问题,Treiber等^[6]提出了一种基于局部反射校正的接触式超声衰减系数测量法。该方法可以在保证耦合状态不变的情况下实现对衰减系数和反射系数的测量,进而确定当前固-液耦合状态。Zhang等^[10]使用该方法分析了被检测物体厚度对横波检测结果的影响。但是,二者均未考虑试件表面粗糙度等因素对测量的影响。

当前对于接触式测量法的研究以及相关理论模型都是基于表面光滑的被测试件展开的,但有研究指出,被测试件表面质量与界面反射系数和信号衰减有关。Nagy等^[11]研究了表面粗糙度对反射信号和透射信号衰减的影响,结果表明表面粗糙度引起的衰减主要取决于粗糙度的均方根值,并推导了粗糙度服从高斯分布时的界面反射系数和透射系数校正公式。Nagy等^[12]后续又研究了表面粗糙度对超声背散射信号的影响,结果表明表面粗糙度会极大地降低信号的信噪比,信号衰减主要是由试件的表面粗糙度导致的,相同表面粗糙度的试件信号噪声几乎是相同的。由此可见,表面粗糙度对超声信号衰减有很大影响。因此,开展考虑被测试件表面粗糙度的衰减系数校正方法研究是非常有必要的,也更符合实际情况。

笔者基于未耦合时粗糙界面反射系数校正理论,在光滑耦合界面的基础上校正了耦合时粗糙界面的反射系数表达式,提出了包含粗糙度信息的接触式超声衰减系数校正模型。搭建了衰减系数超声测量平台,通过对45钢和304不锈钢试件的多次重复试验,验证了该校正模型能够较好地评价材料的超声衰减系数,解决了接触式超声测量法只能应用于光滑试件的测量问题,具有较好的实用价值。

1 衰减系数校正理论

1.1 衰减系数模型

接触式超声换能器测量材料衰减系数的两种常用方法如图1所示,即透射法和反射法。图1(a)是透射法测量示意图,该方法使用2个超声换能器,分别用于发射和接收信号;图1(b)是反射法测量示意图,该方法只需1个超声换能器,既发射信号又接收信号。从示意图可以看出,透射法和反射法的一次回波信号 V_1 和二次回波信号 V_2 的声程并不相同,前者 V_1 、 V_2 的声程分别为 H 、 $3H$ (H 为试件厚度),后者 V_1 、 V_2 的声程分别为 $2H$ 、 $4H$ 。图中 T_L 和 T_R 分别是左右两侧耦合界面的透射系数, R_L 和 R_R 分别是左右两侧耦合界面的反射系数, R_{R0} 是试件右端面未耦合状态下的反射系数, T_{R0} 为是试件右端面未耦合状态下的透射系数。

假设试件是各向同性材料,且由晶粒散射导致的信号扰动相对较小,考虑声波在试件内沿厚度方向传播时的衍射影响,则接触式透射测量法一次回波和二次回波幅值谱表示为^[6]:

$$V_1(f, H) = W(f) G_L T_L (-T_R) G_R D(f, H) \exp[-\alpha(f) H], \quad (1)$$

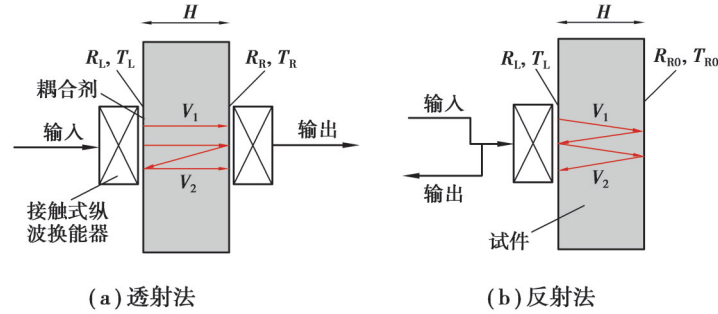


图 1 透射法与反射法测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transmission and reflection methods

$$V_2(f, 3H) = W(f) G_L T_L R_R R_L (-T_R) G_R D(f, 3H) \exp[-3\alpha(f)H]. \quad (2)$$

式中: $W(f)$ 表示输入信号的频谱; G_L 和 G_R 分别是试件左右两侧换能器的信号传递函数; $D(f, nH)$ ($n=1, 2, 3, \dots$) 是声波沿试件轴向传播时引起的衍射衰减, 由 Lommel 衍射校正表达式^[13]得到; $\alpha(f)$ 是与纵波频率相关的衰减系数。

由式(1)和(2)求得透射法的衰减系数谱为:

$$\alpha(f) = \frac{1}{2H} \left[\ln \left(\left| \frac{V_1(f)}{V_2(f)} \right| \right) - \ln \left(\left| \frac{D(f, H)}{D(f, 3H)} \right| \right) + \ln(|R_L R_R|) \right]. \quad (3)$$

记 $\alpha_{\text{total}}(f) = \frac{1}{2H} \ln \left(\left| \frac{V_1(f)}{V_2(f)} \right| \right)$, $\alpha_{\text{diff}}(f) = \frac{1}{2H} \ln \left(\left| \frac{D(f, H)}{D(f, 3H)} \right| \right)$, $\alpha_{\text{coupl}}(f) = \frac{1}{2H} (-\ln |R_L R_R|)$, 则式(3)可简化为

$$\alpha(f) = \alpha_{\text{total}}(f) - \alpha_{\text{diff}}(f) - \alpha_{\text{coupl}}(f). \quad (4)$$

同理, 反射测量法一次回波和二次回波频谱大小表示为:

$$V_1(f) = W(f) (G_L T_L)^2 D(f, 2H) \exp[-2\alpha(f)H], \quad (5)$$

$$V_2(f) = W(f) (G_L T_L)^2 R_L R_R D(f, 4H) \exp[-4\alpha(f)H]. \quad (6)$$

由于反射法中一侧界面处于自由状态, 而在图 1 中的 R_{R0} 是试件右端面未耦合状态下的反射系数, 因此可认为 $R_R = R_{R0} = -1$ 。则反射法的衰减系数谱为:

$$\alpha(f) = \frac{1}{2H} \left[\ln \left(\left| \frac{V_1(f)}{V_2(f)} \right| \right) - \ln \left(\left| \frac{D(f, 2H)}{D(f, 4H)} \right| \right) + \ln(|R_L|) \right] = \alpha_{\text{total}}(f) - \alpha_{\text{diff}}(f) - \alpha_{\text{coupl}}(f). \quad (7)$$

由式(3)和(7)可知, 透射法和反射法的衰减系数表达式与换能器和试件的耦合界面透射系数无关, 只与耦合界面的反射系数有关。经验证, 式(3)和(7)适用于评估光滑试件的衰减系数, 能有效补偿由耦合界面反射带来的衰减损失^[6]。当被测试件表面粗糙时, 耦合界面反射系数将受表面粗糙度的影响, 但在式(3)和(7)中并没有体现出来, 因此, 使用上述衰减系数模型评估表面粗糙的试件, 会使评估结果产生较大偏差。

1.2 校正模型

在接触式超声检测中, 反射系数能够定量描述超声换能器与试件耦合界面间的声学性质, 对超声衰减系数的精确测量具有重要意义。由于接触式超声测量法每次测量时的界面耦合状态是不一样的, 受耦合剂数量、耦合层厚度、换能器预紧力大小和换能器位置等因素的影响, 不能使用传统的声阻抗来计算耦合界面反射系数。Zhang 等^[14]提出了一种计算接触式耦合界面反射系数 R 的方法, 其表达式如下:

$$R = \frac{V(f)}{V_{\text{frecc}}(f)} R_{\text{frecc}}. \quad (8)$$

式中: $V(f)$ 和 $V_{\text{frecc}}(f)$ 分别是声波在界面耦合状态和未耦合状态下的信号一次底面回波频谱幅值; R_{frecc} 是界

面未耦合时的反射系数。显然, $|R_L| < 1, |R_R| < 1$; 对于光滑界面, $R_{\text{freec}} = -1$ 。

基于声场相位扰动的简单解析方法^[11], 超声换能器与粗糙试件未耦合时的高斯分布反射系数表示为:

$$R_{\text{freec}} = R_0 \exp(-2h_w^2 k^2). \quad (9)$$

式中: R_0 是光滑试件表面未耦合时的反射系数, 可近似认为 $R_0 = -1$ ^[10]; h_w 是试件表面的均方根粗糙度值; k 是纵波在介质中传播时的波数, $k = 2\pi f/c$, 这里 c 是声速。

将式(9)代入式(8)得到:

$$R = \frac{V(f)}{V_{\text{freec}}(f)} R_0 \exp(-2h_w^2 k^2). \quad (10)$$

对于表面光滑试件, 其左右两侧耦合界面处的反射系数可以分别表示为:

$$|R_L| = \left| \frac{V_L(f)}{V_{L,\text{freec}}(f)} \right|, \quad (11)$$

$$|R_R| = \left| \frac{V_R(f)}{V_{R,\text{freec}}(f)} \right|. \quad (12)$$

式中: $V_L(f)$ 和 $V_{L,\text{freec}}(f)$ 分别为试件左端面在耦合状态和未耦合状态下一次底面回波频谱幅值; $V_R(f)$ 和 $V_{R,\text{freec}}(f)$ 分别为试件右端面在耦合状态和未耦合状态下一次底面回波频谱幅值。

考虑试件表面粗糙度, 试件左右两侧耦合界面的反射系数分别为:

$$|R_L| = \left| \frac{V_L(f)}{V_{L,\text{freec}}(f)} \right| \exp(-2h_{L,w}^2 k_L^2), \quad (13)$$

$$|R_R| = \left| \frac{V_R(f)}{V_{R,\text{freec}}(f)} \right| \exp(-2h_{R,w}^2 k_R^2). \quad (14)$$

式中: $h_{L,w}$ 和 $h_{R,w}$ 分别表示试件左端面和右端面的表面均方根粗糙度值; k_L 和 k_R 分别为纵波从试件左端面和右端面入射到介质中传播时的波数。

将式(13)和(14)代入式(3)中, 得到透射法下的衰减系数粗糙度校正模型为:

$$\alpha(f) = \frac{1}{2H} \left[\ln \left(\left| \frac{V_1(f)}{V_2(f)} \right| \right) - \ln \left(\left| \frac{D(f,H)}{D(f,3H)} \right| \right) + \ln(|R_L R_R|) - 2(h_{L,w}^2 k_L^2 + h_{R,w}^2 k_R^2) \right]. \quad (15)$$

记 $\alpha_{\text{surf}}(f) = \frac{1}{2H} [2(h_{L,w}^2 k_L^2 + h_{R,w}^2 k_R^2)]$, 则式(15)可简化为:

$$\alpha(f) = \alpha_{\text{total}}(f) - \alpha_{\text{diff}}(f) - \alpha_{\text{coupl}}(f) - \alpha_{\text{surf}}(f). \quad (16)$$

将式(13)代入式(7)中, 得到反射法下的衰减系数校正模型为:

$$\alpha(f) = \frac{1}{2H} \left[\ln \left(\left| \frac{V_1(f)}{V_2(f)} \right| \right) - \ln \left(\left| \frac{D(f,2H)}{D(f,4H)} \right| \right) + \ln(|R_L|) - 2h_{L,w}^2 k_L^2 \right] = \alpha_{\text{total}}(f) - \alpha_{\text{diff}}(f) - \alpha_{\text{coupl}}(f) - \alpha_{\text{surf}}(f). \quad (17)$$

从2种方法的衰减系数校正模型可以看出, 试件表面粗糙度对衰减系数的影响随表面粗糙度增加而增加。对衰减模型进行粗糙度校正, 实则是对反射系数进行校正。

2 试件制备与测量流程

2.1 试件制备与粗糙度测量

以2种广泛应用于工程中的材料45钢和304奥氏体不锈钢作为实验对象。为了保证2种材料的试件内部微观结构一致, 分别在同一根棒材上采用线切割工艺得到5个 $\phi 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 规格的圆柱坯料, 45钢试件编号为A0~A4, 304不锈钢试件编号为B0~B4。对5个45钢试件和5个304不锈钢试件进行端面处理: 1) A0和B0试件上下表面打磨抛光, 近乎为镜面, 作为参考件; 2) A1~A4和B1~B4试件上下表面通过电火花加工得到

一系列不同的表面粗糙度。同一试件上下表面的粗糙度加工工艺参数相同,因此,可以认为各个试件的上下表面粗糙度值相同。试件制备完成后,使用便携式表面粗糙度测量仪 Mitutoyo SJ-210 分别对 2 种材质的各个试件的上下表面粗糙度进行测量,得到表面轮廓算术平均偏差 R_a 、轮廓最大高度 R_z 、相对于轮廓平均线偏差的均方根值 R_{ms} 。利用声波在试件内的传播时间,标定了纵波在各个试件中的声速 c 。2 种材质试件的测量与标定参数如表 1 所示。

表 1 试件测量参数与标定参数

Table 1 The measurement parameters and calibration parameters of specimens

试件编号	$R_a/\mu\text{m}$	$R_z/\mu\text{m}$	$R_{ms}/\mu\text{m}$	H/mm	$c/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
A0	0.078	0.548	0.062	29.85	5 751.445
A1	1.149	7.889	2.238	29.84	5 749.518
A2	3.545	16.491	6.734	29.97	5 769.009
A3	8.215	38.533	14.557	29.87	5 760.849
A4	14.208	62.465	24.368	29.94	5 752.161
B0	0.089	0.661	0.077	29.91	5 670.009
B1	1.256	8.689	2.752	29.88	5 659.817
B2	5.368	32.533	10.557	29.95	5 665.904
B3	12.917	53.485	21.187	29.93	5 662.486
B4	20.354	116.330	27.784	29.94	5 660.205

2.2 实验系统组成

本实验以 FieldGo N9 ATX 便携一体机作为控制平台,该工控机有多个内置 PCI 插槽,可用于安装信号采集卡和发射卡。信号源采用美国 JSR Ultrasonic 公司生产的 PRC50 脉冲发射板卡,其最大激励电压为 475 V。该发射卡集成了前置放大器,增益范围为 $-14\sim 60$ dB。数据采集使用台湾凌华公司生产的 AD-Link PCIE9852 采集卡,其最大采样频率为 200 MHz,AD 转换位数为 14 位。将以上硬件集成于工控机中,并使用 LabView 完成 DAQ 系统搭建。当声波波束直径远大于波长和表面粗糙度相关长度时,接收信号是相干信号;反之,接收信号不可避免地包含非相干散射分量和其他干扰信号^[11]。因此,选择以名义中心频率 10 MHz、晶片直径 6 mm (0.25 英寸)的 Olympus V112S-RM 指尖接触式单晶纵波换能器作为实验检测探头;选取 Olympus B2 作为耦合剂,因其黏稠且具有较高的声阻抗,是用于粗糙表面及高衰减性材料的理想耦合剂。整个实验系统组成如图 2 所示。

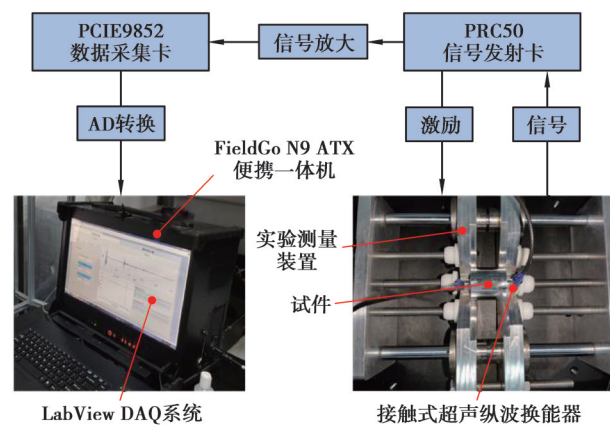


图 2 实验系统组成

Fig. 2 Experimental system

2.3 测量流程

由于试件与超声换能器耦合界面的耦合状态与许多因素(如施加在换能器上的应力大小、换能器位置、耦合层厚度等)有关,界面耦合状态是不可复现的,只能在测量中消除不同耦合状态对结果的影响。根据反射系数的计算公式(8),结合透射法和反射法,采用了6步测量法^[6],测量流程如图3所示,并设计了图2中右侧的测量装置。该测量装置可以保证每次测量时换能器与试件的耦合位置几乎相同并保证2个超声换能器的对中性,从而保证在耦合状态不变的情况下实现对表面反射系数和衰减系数的同时测量,解决了在使用接触式超声换能器测量时换能器与试件接触面之间耦合情况不确定的问题。

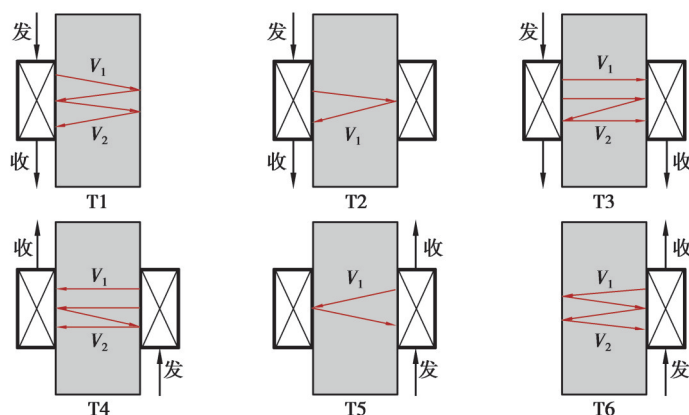


图3 测量流程

Fig. 3 Measurement process

测量流程的6个步骤如下:

第1步(T1),使用纵波换能器1接收来自试件右侧自由界面的反射信号并记为 $V_{R,free}^R(t)$ 。

第2步(T2),将纵波换能器2布置在试件右侧与试件耦合,使用纵波换能器1接收来自右侧耦合界面的反射信号并记为 $V_R^R(t)$ 。

第3步(T3),纵波换能器1发射信号,纵波换能器2接收信号,则可获得从换能器1到换能器2的透射信号并记为 $V_{L \rightarrow R}^T(t)$ 。

第4步(T4),互换纵波换能器1、2的收发特性,获得从换能器2到换能器1的透射信号并记为 $V_{R \rightarrow L}^T(t)$ 。

第5步(T5),只使用纵波换能器2发射信号和接收信号,获得来自试件左侧耦合界面的反射信号并记为 $V_L^R(t)$ 。

第6步(T6),取下纵波换能器1,使用纵波换能器2接收来自试件左侧自由界面的反射信号并记为 $V_{L,free}^R(t)$ 。

由获得的各反射信号和透射信号得到各信号的频谱,并分别记为 $V_{R,free}^R(f)$ 、 $V_R^R(f)$ 、 $V_L^R(f)$ 、 $V_{L,free}^R(f)$ 、 $V_{L \rightarrow R}^T(f)$ 和 $V_{R \rightarrow L}^T(f)$,由式(11)和(12)计算得到两侧耦合界面的反射系数。在知道试件左右两侧表面粗糙度的情况下,由式(15)和(17)得到透射法和反射法的衰减系数。

3 实验数据分析

3.1 有效性和实用性分析

设置实验系统采样频率为200 MHz,激励电压为300 V,反射增益和透射增益分别为-7 dB和-8 dB,以窗宽为200的汉宁窗对时域信号的一次和二次底面回波进行FFT变换,得到对应频谱。图4是在实验中采集的高信噪比反射和透射时域信号以及对应的一次底面回波和二次底面回波频谱。从图4(a)和图4(b)的一次底面回波和二次底面回波的频谱可知,相比于一次底面回波频谱,二次底面回波频谱的最大峰值所对应频率与一次底面回波频谱并不相等,且受声程、表面粗糙度以及材料内部微观尺寸的影响比一次底面回波大。因

此,在计算衰减系数时直接取频谱最大峰值进行计算,取一次底面回波频谱最大峰值所在频率为信号中心频率。图 5 和图 6 分别是由频谱分析得到的 45 钢试件和 304 不锈钢试件衰减系数校正前后的计算结果,图中总衰减代表 $\alpha_{total}(f)$,修正前衰减代表 $\alpha_{total}(f) - \alpha_{diff}(f) - \alpha_{coupl}(f)$,修正后衰减代表 $\alpha_{total}(f) - \alpha_{diff}(f) - \alpha_{coupl}(f) - \alpha_{surf}(f)$,每个试件的实验数据均是多次采样后取的平均值。

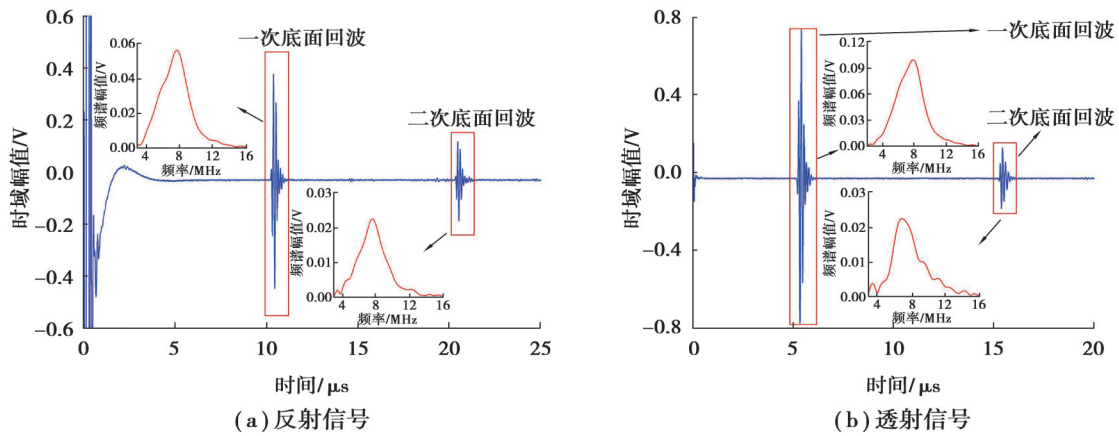


图 4 时域信号及一次底面回波和二次底面回波频谱

Fig. 4 Time domain signal and the spectrum of first bottom echo and second bottom echo

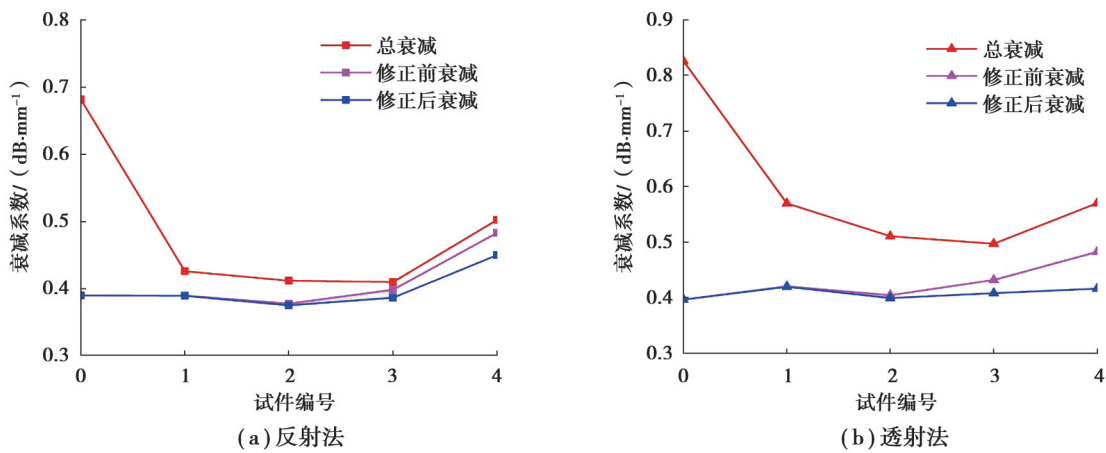


图 5 45 钢试件反射法和透射法校正结果

Fig. 5 Calibration results of reflection method and transmission method for 45 steel specimens

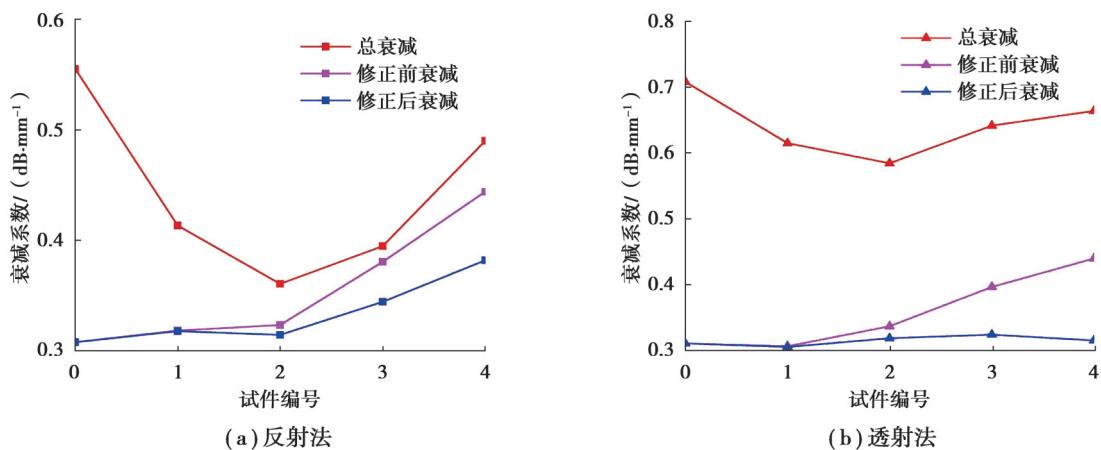


图 6 304 不锈钢试件反射法和透射法校正结果

Fig. 6 Calibration results of reflection method and transmission method for 304 stainless steel specimens

从图5和图6可以观察得到,对于粗糙度较小的试件A0~A3和B0~B2,未校正前的衰减系数随表面粗糙度增加而减小,且减小程度逐渐变小。但对于粗糙度较大的试件A4和B3~B4,未校正前的衰减系数又随表面粗糙度增加而增加,说明表面粗糙度存在一个临界值,在这个临界值范围内,表面粗糙度对衰减系数的影响是负相关的,超出临界值后的影响是正相关的。此外,对于反射测量法和透射测量法,在粗糙度较小时,2种方法的衰减系数校正前后结果基本一致,但当表面粗糙度较大时,若以试件A0和B0的衰减系数作为标准值,则2种方法未校正时存在较大的相对误差。对于45钢试件,反射法和透射法未校正时的最大相对误差分别为24.004%和21.736%,衰减系数经校正后相对误差得到了明显改善,反射法和透射法校正后的最大相对误差分别为15.475%和5.002%。对于304试件,反射法和透射法未校正时的最大相对误差分别为44.430%和41.612%,校正后的最大相对误差分别为24.181%和4.283%。由校正结果可知,对于表面粗糙度较大的试件,本研究中提出的衰减系数评估模型可以显著地补偿由表面粗糙度带来的衰减,且适用于不同材质的试件。相较于反射法,透射法的校正效果更显著,故对于粗糙度较大的试件宜采用透射法。

3.2 表面粗糙度对信号时域和频域的影响

图7和图8分别是各个45钢试件反射信号和透射信号中一次底面回波时域波形及其频谱。图7中的反射和透射一次底面回波时域波形与频谱表明,时域信号与频谱的变化趋势是相同且同步的。随着表面粗糙度增大,时域信号幅值和频谱幅值逐渐减小,且幅值减小量随粗糙度增加而减小。相较于表面粗糙度较大(10~25 μm)的试件(如试件A3、A4),表面粗糙度较小(0~10 μm)的试件(如试件A0~A2),一次底面回波时域信号和频谱对粗糙度的变化更敏感。由图7(b)和图8(b)反射和透射一次底面回波频谱可以看出,对于试件A0~A3,随着表面粗糙度增加,一次底面回波频谱峰值逐渐减小,且减小程度随粗糙度增加而减小,同时频谱有左移趋势。

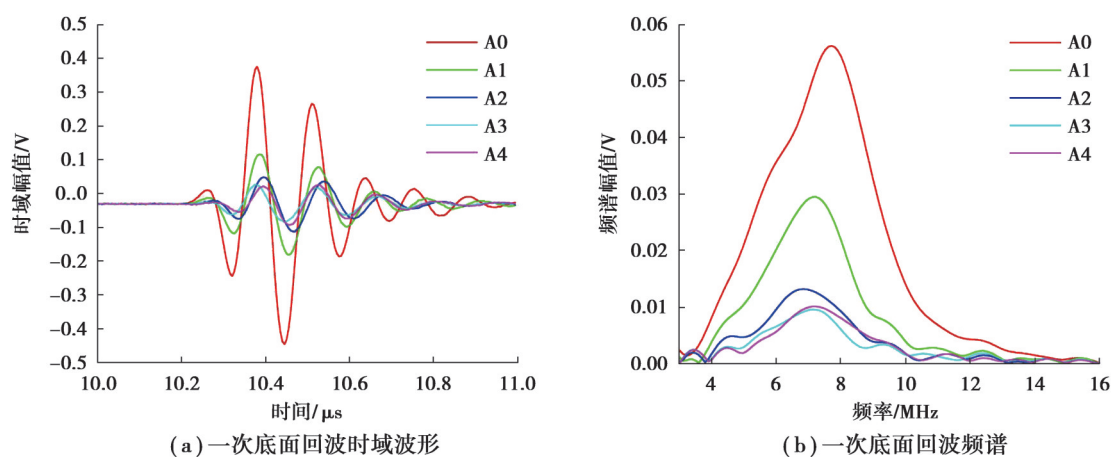


图7 45钢试件反射一次底面回波时域信号及频谱

Fig. 7 The reflection time domain signals and spectra of the first bottom echo for 45 steel specimens

时域信号和频谱峰值的这种变化主要有两方面的原因:一是声波在穿越粗糙界面时发生漫反射,且界面越粗糙,漫反射越严重^[15],致使时域幅值和频域幅值随粗糙度增大而减小;二是在相同表面粗糙度下,粗糙度对高频超声信号的削弱比对低频信号的削弱更显著,且低频信号衰减小于高频信号,故粗糙度越大,在界面发生漫反射的信号高频成分越多,频谱发生左移。试件A4的反射和透射一次底面回波时域波形及其频谱都略大于试件A3,且前者频谱相对于后者有右移趋势;同时由图5(a)和图5(b)可知,前者的衰减系数大于后

者。这是因为在一定范围内,表面粗糙度引起的衰减主要取决于粗糙度的均方根值,当超出这一范围,衰减越来越依赖于表面轮廓^[11]。

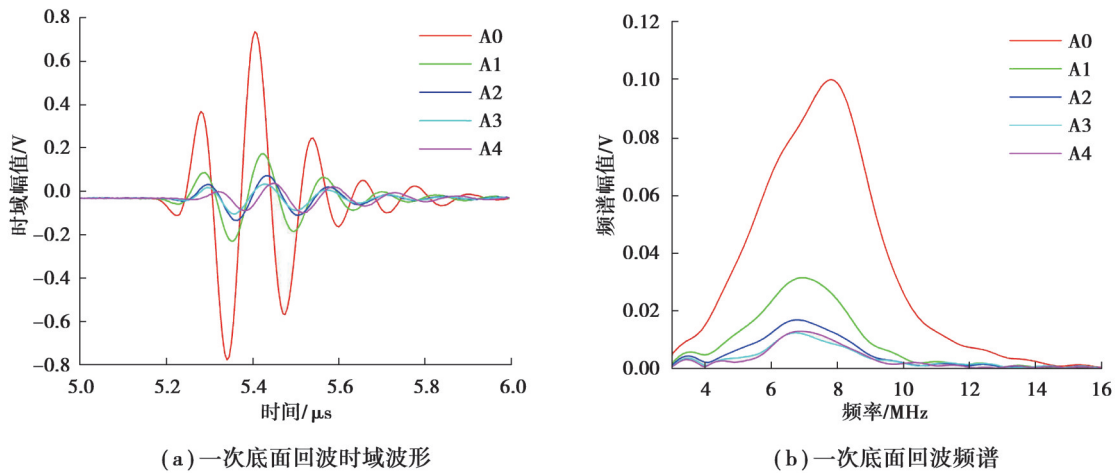


图8 45钢试件透射一次底面回波时域信号及频谱

Fig. 8 The transmission time domain signals and spectra of the first bottom echo for 45 steel specimens

4 结束语

以不同表面粗糙度、不同材质试件验证了所提出的衰减系数评价模型的有效性和实用性,并分析了粗糙度对信号时域和频域的影响,得到了以下结论。

1)对表面粗糙度较大的试件,本文提出的衰减系数评价模型能够有效补偿由表面粗糙度引起的衰减损耗。

2)对于表面粗糙度较大的试件,透射法的粗糙度补偿效果显著优于反射法,前者经校正后的衰减系数相对误差在6%以内。

3)对于粗糙度较小和较大的试件,衰减系数随粗糙度的变化趋势是截然相反的,存在一个转折点,确定该转折点或转折范围需要进一步的研究。

参考文献

- [1] Lin L, Zhang W, Ma Z Y, et al. Porosity estimation of abrasible seal coating with an optimized support vector regression model based on multi-scale ultrasonic attenuation coefficient[J]. NDT & E International, 2020, 113: 102272.
- [2] Renaud A, Tie B, Mouronval A S, et al. Multi-parameter optimization of attenuation data for characterizing grain size distributions and application to bimodal microstructures[J]. Ultrasonics, 2021, 115: 106425.
- [3] Kube C M. Attenuation of laser generated ultrasound in steel at high temperatures; comparison of theory and experimental measurements[J]. Ultrasonics, 2016, 70: 238-240.
- [4] Zhang J, Song Y F, Li X B, et al. Comparison of experimental measurements of material grain size using ultrasound[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(2): 1-8.
- [5] Hartmann B, Jarzynski J. Immersion apparatus for ultrasonic measurements in polymers[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1974, 56(5): 1469-1477.
- [6] Treiber M, Kim J Y, Jacobs L J, et al. Correction for partial reflection in ultrasonic attenuation measurements using contact transducers[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 125(5): 2946-2953.

- [7] Guan S Y, Wang X K, Hua L, et al. Quantitative ultrasonic testing for near-surface defects of large ring forgings using feature extraction and GA-SVM[J]. *Applied Acoustics*, 2021, 173: 107714.
- [8] Zhang C X, Li X B, Song Y F, et al. Evaluating the grain size in curved components using the ultrasonic attenuation method with diffraction correction[J]. *NDT & E International*, 2016, 84: 20-26.
- [9] Li X B, Han X Q, Arguelles A P, et al. Evaluating grain size in polycrystals with rough surfaces by corrected ultrasonic attenuation[J]. *Ultrasonics*, 2017, 78: 23-29.
- [10] Zhang G D, Liu X L, Li X B, et al. Measurement of shear wave attenuation coefficient using a contact pulse-echo method with consideration of partial reflection effects[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(11): 115601.
- [11] Nagy P B, Adler L. Surface roughness induced attenuation of reflected and transmitted ultrasonic waves[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1987, 82(1): 193-197.
- [12] Nagy P B, Rose J H. Surface roughness and the ultrasonic detection of subsurface scatterers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 73(2): 566-580.
- [13] Rogers P H, van Buren A L. An exact expression for the Lommel-diffraction correction integral[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1974, 55(4): 724-728.
- [14] Zhang J, Drinkwater B W, Dwyer-Joyce R S. Acoustic measurement of lubricant-film thickness distribution in ball bearings[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 119(2): 863.
- [15] 宋永锋, 李雄兵, 史亦韦, 等. 表面粗糙度对固体内部超声背散射的影响[J]. *物理学报*, 2016, 65(21): 202-212.
Song Y F, Li X B, Shi Y W, et al. Effects of surface roughness on diffuse ultrasonic backscatter in the solids[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(21): 202-212. (in Chinese)

(编辑 罗 敏)