

非接触空气耦合超声波的材料无损评价与检测

常俊杰^{1,2}, 卢超¹, 川嶋絃一郎³

(1. 无损检测技术教育部重点实验室(南昌航空大学), 南昌 330063; 2. 日本探头株式会社, 日本横滨 2320033;
3. 日本超声波材料诊断研究所, 日本名古屋 4660062)

摘要: 主要探讨了一种基于穿透式同侧检测模式(V透射法)的非接触空气耦合超声波无损检测技术。首先简要阐述了空气耦合超声波检测技术的基础知识及V透射法检测模式的基本原理,其次介绍了利用V透射法进行非接触空气耦合超声波声速测量以及内部缺陷检出的示例,成功检出了传统超声波检测方法难以检测的钢筋与混凝土界面缺陷并成像;然后通过改变超声波在空气中的入射角,在模拟树脂薄层材料和CFRP复合材料上激励板波,成功实现了平面损伤分布成像和深度方向的损伤分布成像;最后提出了空气耦合超声波检测时的注意事项。

关键词: 空气耦合超声波; 材料评价; 板波; 混凝土; CFRP; 涂层

中图分类号: TB115.28

文献标志码: A

0 引言

在无损检测行业中,X射线和电磁用于非接触无损检查,而超声波一般用于接触式或水浸法的无损检查。虽然超声波检测方法中也有少量方法使用电磁超声波探头(EMAT)和激光超声波来进行非接触测量,但是由于超声波集束的指向性和焦点很难控制,而且在激励和接收超声波时需要特殊装置,因而限制了它们的应用范围。另外,目前的激光超声波法和电磁超声波法不适合检查微小缺陷。由于激光超声波和X射线对人体有一定的危害,在生产现场需采取安全措施,如穿戴X射线防护服及遮光眼镜等以保护工作人员。因此,实现如X射线和电磁检测那样的完全非接触超声波检测是从事无损检测人员多年来的梦想。

空气耦合超声波法(air-coupled ultrasonics)用空气代替水浸法中的水,除了可以实现与水浸法同样的功能外,还由于低频超声波在空气中的波长比水中小,因此具有更容易聚焦的特点。2002年SecondWave Systems公司的Bhardwaj出版了题为

Non-contact Ultra-sound: the Final Frontier in Non-destructive Analysis 的空气传播超声波法宣传手册^[1],该手册虽然提出了非接触空气传播超声波法的有效性,但是并没有突破传统超声波法的范畴。常用的空气耦合超声波检测法,多使用穿透式异侧检测模式(透射法),且被限制在复合材料、木材、绿色陶瓷等传统超声波法很难检测的致密度稀的多孔隙材料检测^[2-5],其主要原因是:a)由于空气和被检测材料声阻抗的巨大差异使得气固界面耦合过程中能量损失极大,因而进入被检测材料内的超声波能量低、振幅小;b)超声波在传播过程中,其衰减与频率有关,尤其在空气中衰减系数极大,其适用的频率范围被限制在1 MHz以下;c)空气耦合超声波检测适用频率范围低,其脉冲余振较长,且在检测过程中获得的信号幅值极低,所以不能使用反射回波法。

为了更好地发挥空气耦合超声波检测法的作用,针对上面三方面的问题,提出了解决对策:对于第一个缺点,可以通过高灵敏度空气耦合探头与合适的带通滤波前置放大器相组合,将接收信号增幅100~120 dB(10万倍~100万倍),以实现使用传统

收稿日期: 2014-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(11464030);江西省自然科学基金项目(CA201308096);无损检测技术教育部重点实验室(南昌航空大学)开放基金课题(ZD201229001);博士启动基金(EA201308357)

作者简介: 常俊杰(1964—),女,辽宁大连人,副教授,博士,主要从事超声波材料无损检测与评价方面的研究。

的超声波发射接收器进行空气耦合超声波检测;对于第二个缺点,可以活用低频超声,以检测出传统超声波法不能检测或很难检测的软质材料以及高衰减材料的声速及内部缺陷;对于第三个缺点,可以通过使用2个探头的V透射法的检测模式,即将2个探头设置在检测材料的同侧进行非接触检测,以代替传统的反射回波法。

本文首先简要地介绍了空气耦合超声波检测技术的基础知识,其次介绍了利用2个探头从检测材料同侧进行非接触检测的V透射法检测模式,并对钢筋混凝土、树脂涂层材料、复合材料进行声速测定和损伤成像,以验证非接触空气耦合超声波V透射法检测模式的有效性和实用性。

1 空气耦合超声波检测技术基础

超声波在不同物质界面处垂直入射时,其声压往复透射系数可用下面的公式来表示:

$$T_{12} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (1)$$

其中: Z_1 和 Z_2 是从一种介质(入射侧)进入另一种介质(透射侧,一般为被检测材料)的特性声阻抗,其定义为 $Z = \rho v$ (其中 ρ 为密度、 v 为声速), Z 的单位为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,用Rayl表示($1 \text{ Rayl} = 1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。表1给出了在室温、一个大气压下超声波在几种常见介质中传播的特性声阻抗(Z)和透射系数(T)。透射系数 T_{12} 表明了超声波从一种介质1进入另一种介质2时的能量损失状况。

表1 常见介质的特性声阻抗和透射系数^[6]

介质1/Rayl	介质2/Rayl	透射系数 T_{12}	衰减/dB
$Z_w: 1.48\text{M}$ (水)	$Z_{Al}: 17\text{M}$ (铝)	0.30	10
$Z_a: 428.6$ (空气)	$Z_{Al}: 17\text{M}$ (铝)	0.000 1	80
$Z_w: 1.48\text{M}$ (水)	$Z_s: 46.4\text{M}$ (钢)	0.13	18
$Z_a: 428.6$ (空气)	$Z_s: 46.4\text{M}$ (钢)	0.000 034	88

注:衰减 $1 \text{ dB} = 20 \log_{10} T_{12}$ 。

从表1中可以看出:接触法或水浸法的声压往返透射率在小数点后一位的范围之间变动;而从空气向钢中垂直入射超声波时的声压往返透射率为 3.4×10^{-5} ,其往返透射率仅为接触法或水浸法的 $1/10\ 000$,即使忽略在空气中的衰减,其灵敏度也要降低80 dB。所以,巨大的特性声阻抗差是空气耦合超声波检测技术的一个主要难题。另外,超声波在介质中传播时能量的吸收衰减和散射衰减与发射频率和传播距离有关。发射频率越高其衰减就越大,同时传播距离越远衰减也越大^[3]。所以,使用增幅率仅有60 dB的传统超声波发射接收器及1 MHz

以上的超声波,是不能用空气耦合超声波检测法来实现材料内部的反射波检测的。

为解决以上问题,日本的Japan Probe公司研发了一种内置增幅80 dB的高功率超声波发射接收器JPR-600。这种超声波发射接收器可以连续发射300个波数的电压为600 V矩形脉冲,采用空气特性声阻抗耦合好的高灵敏度空气耦合超声波探头和可增幅60 dB的高信噪比带通滤波信号增幅器,实现了空气耦合超声波检测技术的实际应用^[5]。

如上所述,由于空气和固体材料试件间存在着巨大的特性声阻抗差,需要将接收信号增幅100 dB,又由于低频超声波的脉冲余振较长,材料内部缺陷的反射波及散乱波被材料表面的反射波所遮盖。所以用单探的脉冲回波法几乎不能检测出材料内部缺陷的反射及散乱波形。但是,用专用探头很容易接收从材料内部到达表面的超声波波动。所以,空气耦合超声波法利用发射信号和接收信号的专用探头的透射法或同侧V透射法,可以实现各种目的的检测。各种空气耦合超声波检测方法示意图如图1所示。

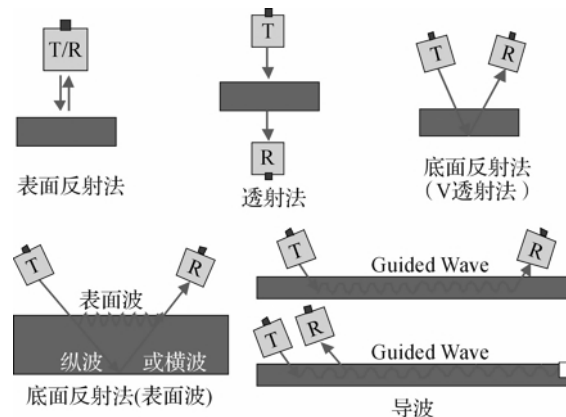


图1 空气耦合超声波检测方法

2 穿透式同侧检测模式(V透射法)

斜入射同侧检测法将发射信号探头和接收信号探头设置在检测材料的同侧,其探头配置如图2所示。假设空气中的声速为 V_a ,测试材料的声速为 V_s (纵波或横波速度),全部的传播时间为 T ,空气中的传播距离为 L_a ,测试材料的厚度为 h ,入射角 θ_i 的斜角入射时的测试材料内的传播距离 L_s 可由式(2)给出。

$$L_s = \frac{2h}{\cos \theta_r} \quad (2)$$

根据Snell's law 折射角 θ_r 可由式(3)给出。

$$\frac{\sin \theta_i}{V_a} = \frac{\sin \theta_r}{V_s} \quad (3)$$

又由于,

$$T = T_s + T_a, T_a = \frac{L_a}{V_a}, T = \frac{L_s}{V_s} \quad (4)$$

其中全部过程的传播时间 T 可通过实验被测得, V_a, L_a, L_s 是已知的, 因此声速可由式(5)求出。

$$V_s = \frac{2h}{\cos(\theta_r)(T - T_a)} \quad (5)$$

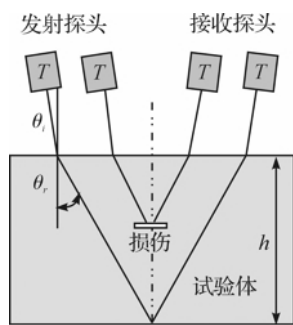


图2 斜入射同侧检测法的探头配置

2.1 混凝土的损伤检测

按照图2所示的探头配置方法,将超声波从空气斜角(入射角 1.5°)入射到混凝土(纵波速度约 3880 m/s ,横波速度约 2000 m/s)中时,在混凝土中产生折射角为 15° 的纵波。使用探头的公称频率为 100 kHz ,晶片大小为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,试验体混凝土的厚度为 $h = 200 \text{ mm}$ 。变化超声波在空气中的传播距离,并记录接收到的纵波波形,如图3所示。

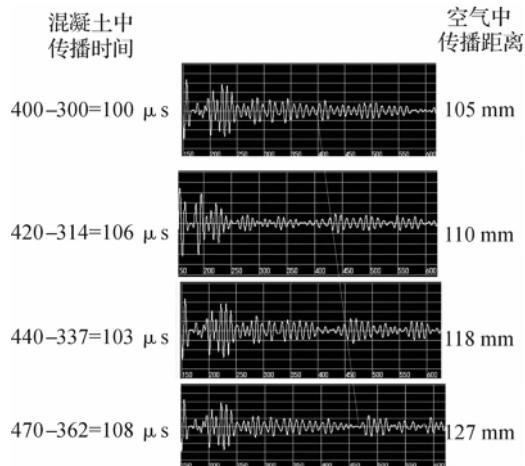


图3 混凝土的声速测量

图3中的右侧数字为超声波在空气中变化的传播距离,左侧数字为超声波在混凝土内的传播时间,斜线是纵波接收的概略时刻。如此采用通过改变空中传播距离记录接收波形的检测方法,可以减低由于混凝土中的粗骨材产生的声速测定误差。由于试验体的材料表面存在较小的凹凸,所以超声波在测试材料内的传播时间发生了数 μs 的变化,其平均传

播时间是 $106 \mu\text{s}$,由此可算出纵波速度为 3900 m/s 。同样可求出其横波的传播速度。

为了评价钢筋混凝土的钢筋和混凝土的附着程度,设计了带有模拟缺陷的钢筋混凝土试样,即把 9 mm 直径的平滑钢棒的一部分用胶带缠裹后埋入距离混凝土表面 50 mm 深处,测试情况如图4所示。空气耦合探头的频率为 200 kHz ,用手动扫描装置V透射法进行了不完全附着部位的成像处理。图4中,(a)是测试现场照片,(b)是模拟不完全附着部位的成像,白线框以内 $0 < y < 20 \text{ mm}$ 的范围是模拟不完全附着部位,(c)是接收信号波形。

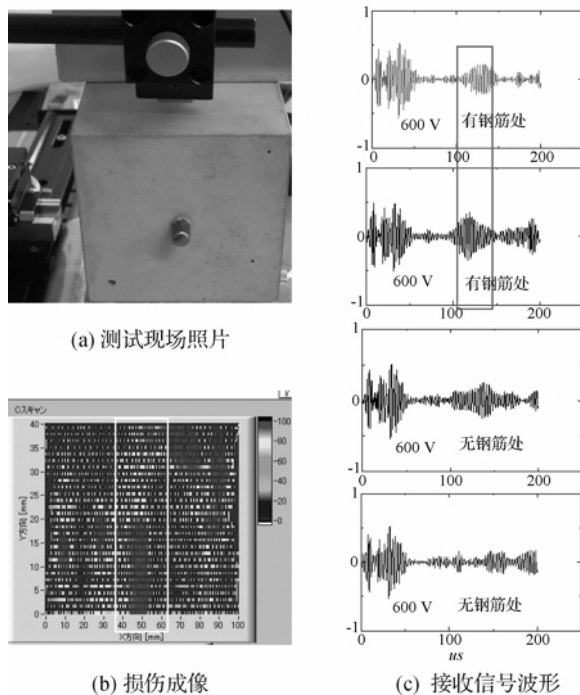


图4 混凝土的损伤成像

从图4中可以看出,接收到的信号与损伤部位有良好的对应关系,表明用这种方法可以实现混凝土损伤部件的快速检测。

2.2 模拟树脂薄层损伤成像

树脂薄层损伤成像的检测状态如图5(a)所示。为了讨论非接触方法是否能检测出钢板上的树脂薄层损伤或涂层的剥离损伤,在一张厚 10 mm 的不锈钢钢板上放置形状和尺寸不同的纸片,再用胶带粘着,制造具有模拟剥离缺陷的薄板试件,如图5(b)所示。图5(b1)为模拟剥离部位的放置纸片的状态,图5(b2)为粘着胶带后的模拟树脂薄层试验材外观,纸片处为模拟损伤。实验方法为空气耦合超声波表面波/板波法,在粘有胶带的钢板上激励表面波。实验使用 Japan Probe 制的公称频率为 400 kHz 平版式探头,晶片尺寸为 $20 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$,探头

的配置如图 5(a)所示,在接收探头的前端配置了直径 5 mm 的接收窗口。图 5(c)的左侧图像是 5 mm × 5 mm 四方形模拟损伤的成像结果。

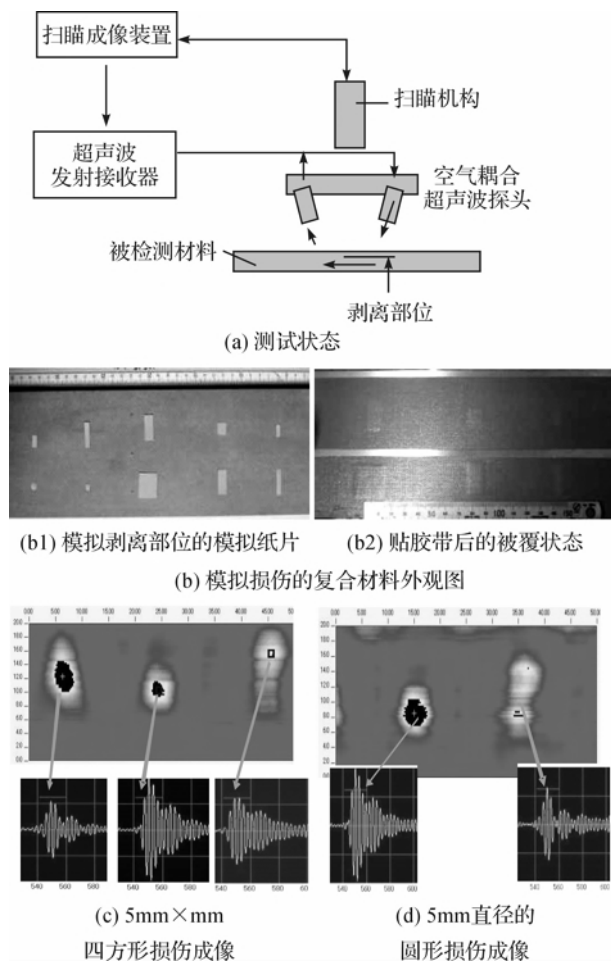


图 5 模拟树脂涂层成像

从图 5 中可以看出,损伤成像与实际的损伤均具有良好的对应关系,为损定量评价损伤程度打下了良好的基础。

2.3 复合材料内部的损伤成像

在利用空气耦合超声波透射法代替传统的超声波水浸法并用于检测复合材料的冲击损伤部位的成像时,将探头设置在测试材料两侧的异侧穿透法检测模式,不能得到缺陷部位在试件厚度方向信息(即深度信息)。为此,探讨利用如图 6(a)所示的 V 透射法,在粘有胶带的钢板上激励表面波,进行了厚度方向损伤分布的成像处理试验。试验使用 Japan Probe 制的点聚焦空气耦合探头,其中心频率为 1.6 MHz、焦点距离为 30 mm。为了不接收发射探头的发射信号,如图 6(a)所示在发射信号探头的先端部位粘贴了遮音胶带。图 6(b)是有冲击损伤的复合材料外观图。图 6(c)表示复合材料损伤部位的平面成像(即 C 扫描成像),在图 6(c)中有 3 根水平线

C1、C2 和 C3,与这 3 根线相对应的断面损伤分布分别表示在图 6(d)、图 6(e)和图 6(f)。由此可知,利用 V 透射法可以判断损伤在深度方向的大概状况。

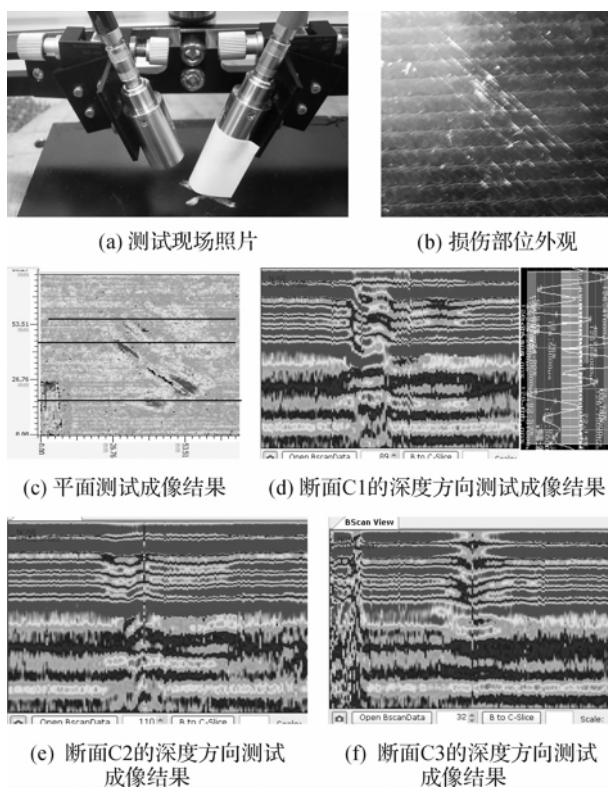


图 6 复合材料内部的损伤成像

从图 6 中可以看出,对于复合材料而言,无论是内部损伤还是外部损伤,均具有良好的对应性,表明该方法在复合材料界面及内部损伤成像评价中的可行性和有效性。

3 空气耦合超声波检测时的误差分析

3.1 低频超声波的混入

传统的接触法或水浸法使用的是频率为数 MHz 至数十 MHz 的超声波,此频率范围内的超声波指向性比较好,可以认为超声波是直进传播的。相比之下,空气耦合超声波法使用的频率比传统的超声波法使用的频率低 1~2 个位数,超声波的指向性不高,直进性较差。在利用发射信号探头与接收信号探头之间放置试验体的异侧穿透法(透射法)检测时,试验体的大小在探头面积的数倍程度下,为了避免发射探头发射的超声波混入,需要在试验体的四周设置遮声屏蔽,以避免不必要的测量误差。

如图 1 所示,在被检测材料的同侧配置发射探头和接收探头的超声波 V 透射法的情况下,发射信号探头与接收信号探头间要放置遮声屏蔽,以避免接收到从被测物表面发出的反射波。

在使用频率 200 kHz 以下的传感器时,当增幅比率超过 100 dB 时,发射信号探头的振动会经由探头外壳、探头支架传至接收探头端,被接收信号的探头接收混入接收信号,造成测试误差。所以,需要对发射信号探头和接收信号探头进行振动绝缘处理,以提高测量精度。

3.2 低频超声波的波长变大

当频率为 5 MHz 的超声波在钢铁中传播时,其纵波波长约 1.2 mm,横波波长约 0.6 mm;如将 5 MHz 的超声波变为 100 kHz,纵波波长约 60 mm,横波波长约 30 mm。特别是在发射/接收模式变换进行表面波或板波测试时,必须避开长波长的波引起的负干涉所发生的振幅降低。例如,使用传播方向长度 30 mm 左右的探头,接收波长(λ)32 mm 的表面波($\lambda/2=16, \lambda/4=8, \lambda/8=4$ mm)时,会同时接收到 1 个波长内的不同位相对应的所有振幅的波,由于它们会互相抵消,因此接收到的信号是没有意义的。所以在接收信号探头表面,需设置带有传播方向长度最少 $\lambda/4$ (或 $\lambda/8$)的接收窗来检出有意义的信号。这里,与激光超声波检测时能检出的表面波上限频率是由激光束直径所决定的。

3.3 模式变换波激励时的入射角设定

一个大气压下,超声波在空气中的传播速度约 340 m/s,由于空气中的超声波传播速度很慢,必须设定高精度的入射角。实验室检测时,需要将传感器安装在 2 轴平衡架机构上,向钢中激励表面波时的临界角约为 7° ,向混凝土中发射折射角 30° 的纵波时,入射角约为 2° 。

3.4 声音速测量时的空中传播时间

由于空气中的声速仅是钢的纵波速度的 $1/17$,空气中传播时间的测量误差对材料声速的影响很大。所以,在声速测量时,正确测量空气中的传播时间是非常重要的,也是不可缺少的。垂直入射透射法(异侧穿透法),可用脉冲反射法,事先分别测量出发射信号探头及接收信号探头与试验体表面间的传播时间,再算出试验体内部的传播时间。图 1 所示的 V 透射法,在测量厚的试验体的纵波及横波时,入射角在 5° 以下时,与上述同样可以使用超声在空气中传播的垂直距离。

在测量表面波时,由于入射角会略微变大,上述

方法不能使用。在此情况下,将发射信号探头或接收信号探头沿水平方向移动一定距离(ΔL),测量 2 回的传播时间,通过算出 2 回的传播时间差求出表面波传播 ΔL 距离的时间。

4 结 语

利用同侧检测法(V 透射法)的非接触空气耦合超声波检测技术,对钢筋与混凝土界面、模拟树脂薄层损伤、冲击损伤的 CFRP 复合材料厚度方向的损失分布进行了成像测试。证实了传统的接触法或水浸法不能测量的比楔块树脂中纵波声速或水中声速低的材料的表面波或导波波速,可以利用空气耦合超声波法进行测量。因此利用空气耦合超声波可广泛进行各种树脂板、积层板的损伤检查及各种波速测量。

空气耦合超声波法虽然与接触式或水浸超声波法相比操作复杂,但由于其非接触无损无害且可以定量评价,正逐渐地应用于工业制品的无损检查与评价。为了降低不良率导入非接触无损检测与评价的产业正在渐渐增加,空气耦合超声波检测法将可能成为某些材料检测的有力武器。

参考文献:

- [1] Bhardwaj M C. Non-contact Ultrasound; the Final Frontier in Non-destructive Analysis[M]. Boalsburg: Second Wave Systems, 2002.
- [2] 周正干,魏 东. 空气耦合式超声波无损检测技术的发展[J]. 南昌航空大学学报:自然科学版, 2007, 21(3): 96-100.
- [3] 周正干,魏 东,向 上. 线性调频脉冲压缩方法在空气耦合超声检测中的应用研究[J]. 机械工程学报, 2010, 18(1): 24-28.
- [4] 川嶋絃一郎. ものづくりのための超音波非破壊評価・検査[M]. 東京:養賢堂, 2009.
- [5] 川嶋絃一郎. 空気伝搬超音波法による非破壊材料評価と検査[J]. 非破壊検査: Journal of NDI, 2009, 58(7): 250-255.
- [6] 常俊杰,小倉幸夫,川嶋絃一郎. 空气耦合超声波的非破坏检查及成像处理[C]//全球华人无损检测技术高峰论坛. 厦门, 2011: 157-164.
- [7] 超音波便覧編集委員会. 超音波便覧[M]. 東京:丸善株式会社, 1999: 4-16.

(下转第 542 页)

Development of Real-time Prevention and Control Platform for Flow Corrosion of Atmospheric Distillation Tower Return System

OU Guo-fu¹, FANG Hua-ping¹, WANG Kai¹, REN Jia¹, JIN Hao-zhe¹, QIU Dong-sheng², HUANG Ai-bin

- (1. Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. Sinopes Ihenhai Refineng & Chemical Co., Ltd., Ningbo 315207, China)

Abstract: The real-time prevention and control platform for flow corrosion is developed based on atmospheric distillation tower return system of a refinery. According to the corrosion process of atmospheric distillation tower return system, failure control system based on flow corrosion theory is established. Failure control system includes corrosion failure form, failure control parameters, critical values as well as corrosion prevention and control measures. Then, .NET Remoting technology is applied to research and develop a real-time prevention and control platform which integrates collection of basic working condition data, corrosion state monitoring, diagnosis and supervision. Meanwhile, distributed development of server and client is realized. This prevention and control platform offers an effective solution for corrosion and protection of atmospheric distillation tower return system.

Key words: atmospheric distillation tower return system; flow corrosion; .NET Remoting technology; prevention and control platform

(责任编辑: 康 锋)

(上接第 536 页)

Nondestructive Material Evaluation and Testing Based on Non-contact Air-Coupled Ultrasonics

CHANG Jun-jie^{1,2}, LU Chao¹, KAWASHIMA Koichiro³

- (1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education (Nanchang Hangkong University), Nanchang 330066, China; 2. Japan Probe Co., Ltd., Yokohama 232 0033, Japan;
3. Ultrasonic Materials Diagnosis Lab., Nagoya 466 0062, Japan)

Abstract: This paper mainly discusses the non-contact air-coupled ultrasonic non-destructive testing method based on transmission same-side testing mode (V transmission method). Firstly, this paper mainly sets forth basic knowledge of air-coupled ultrasonic testing technology and the basic principle of V transmission method. Secondly, this paper introduces the examples in which V transmission method is used for non-contact air-coupled ultrasonic acoustic velocity measurement and internal defect detection. Rebar and concrete interface defect which is hard to detect with traditional ultrasonic testing method is successfully detected. Then, through changing incidence angle of ultrasonic in air and stimulating plate wave on simulated resin material and CFRP composite, plane damage distribution imaging and damage distribution imaging at deeo direction are successfully achieved. Finally, matters needing attention in air-coupled ultrasonic testing are proposed.

Key words: air-coupled ultrasonics; material evaluation; plate wave; concrete; CFRP; coating

(责任编辑: 康 锋)