

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.05.009

涡轮叶片 NiCoCrAlYTa 涂层超声测厚*

刘柯¹ 邬冠华¹ 石剑² 金信鸿¹

(1. 南昌航空大学无损检测教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 中国航发南方工业有限公司 株洲 412000)

摘要: NiCoCrAlYTa 涂层作为航空发动机高温部件的抗氧化涂层而得到广泛应用,涂层的厚度影响其抗氧化性能。利用超声波在涂层和基体间传播中的信号突变现象,采用小波变换技术分离出信号突变点和突变点间时间间隔,计算出涂层厚度,并应用于带有 NiCoCrAlYTa 涂层的涡轮叶片厚度测量,超声涂层厚度测量结果与金相解剖厚度测量数据进行对比,研究表明,使用的超声涂层厚度测量方法获得的涂层与金相法测厚数据基本接近,在平均厚度 150 μm ,测量相对误差在 5% 以内。

关键词: 涡轮叶片; NiCoCrAlYTa; 涂层厚度测量; 超声

中图分类号: TG115.28; TN752.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430.25

Ultrasonic thickness measurement of NiCoCrAlYTa coating on turbine blade

Liu Ke¹ Wu Guanhua¹ Shi Jian² Jin Xinhong¹

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing of the Ministry of Education, Nanchang University of Aeronautics and Astronautics, Nanchang 330063, China; 2. China Airlines Southern Industry Co. Ltd., Zhuzhou 412000, China)

Abstract: NiCoCrAlYTa coating has been widely used as an antioxidant coating for high-temperature components of aeroengine, and the thickness of coating affects its oxidation resistance. In this paper, the signal mutation between the coating and the matrix was used to isolate the time interval between the signal mutation point and the mutation point by wavelet transform. The thickness of the coating was calculated and applied to the thickness of the turbine blade with NiCoCrAlYTa coating Measurement, ultrasonic coating thickness measurement results and metallographic dissection thickness measurement data were compared. The results show that the coating thickness obtained by the ultrasonic coating thickness measurement method is close to that of the metallographic method, and the relative error is about 5% under the average thickness of 150 μm .

Keywords: turbine blade; NiCoCrAlYTa; coating thickness measurement; ultrasound

1 引言

航空发动机长期处于高温氧化性,和热腐蚀性的环境中,因此对部件用材的性能要求越来越高^[1]。目前广泛用于制造飞机发动机叶片的镍基高温合金,因为自身熔点的限制,不能满足不断提高的进口温度要求。叶片不仅需要高温合金材料加工,而且需要表面处理工艺来进一步保护。该 NiCoCrAlYTa 六元高温防护涂层^[2]特点是具有良好的耐高温、抗氧化、耐热蚀性,也可作为热障

涂层的粘接层^[3,4]。表面涂层以及涂层的厚度直接影响到叶片的使用寿命,因此叶片表面涂层的厚度测量具有重要的意义。目前涂层的检测技术主要有红外热波检测、涡流检测、超声检测。红外热波检测利用相同温度下涂层与基体表面的发射率不同,就可以找到涂层的部分缺陷^[5]。首都师范大学用红外热像仪、脉冲热源和计算机图像处理系统等技术研制的脉冲加热波无损检测系统可以对涂层的厚度进行测量^[6]。但红外热波检测的分辨率还不够精确。涡流检测可以对材料表面和亚表面进行检测,但六元金属涂层可以导电,并且由于叶片结构形

状复杂,对由于几何形状引起的边缘效应敏感,有可能出现错误信息。超声检测水浸超声脉冲回波法使用成本较低、效率高,大连理工大学已经可以根据超声体波声压反射系数谱表征,经过快速傅里叶变化(FFT)得到涂层厚度和涂层弹性模量^[7]。南昌航空大学廖欢通过超声频谱分析和比较热障涂层声压反射系数^[8],根据两个极大值或者两个极小值之间的频率间隔确定热障涂层厚度。国内外研究的超声涂层测厚方法都只用于平板试块的厚度检测,并没有应用于实际叶片涂层厚度检测中,特别是对于叶片有一定曲率部分的涂层没有进行过实际有效的超声测厚实验分析。本文对实际应用中的涡轮叶片涂层进行研究。

2 叶片涂层厚度超声测量理论

用水浸超声法对涂层信号进行采集,超声波在涂层中理论传播情况如图1所示,超声波声束从水中垂直入射试样表面 X1,经过涂层表面 X2,最终到达基体底面 Y1。超声波探头接收到基体层底面 Y1 所返回的信号 B21 之前,超声波已经在涂层表面 X1 和涂层底面 X2 发生了多次反射,并且超声波探头已接收到了涂层底面 X2 反射的信号 B11、B12、B13...;超声波入射涂层和基体界面时会产生突变,如果能在接收的混叠信号中提取出产生突变信号的位置点即可得出超声波在涂层中传播时间,通过时间—声程关系式即可得到涂层的厚度^[9]。

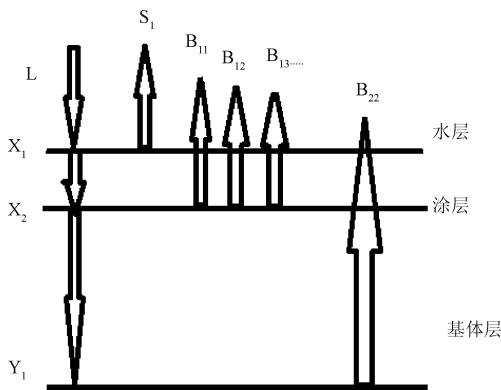


图1 水浸超声波在涂层中传播模型

Fig.1 Propagation model of water immersion ultrasonic wave in coating

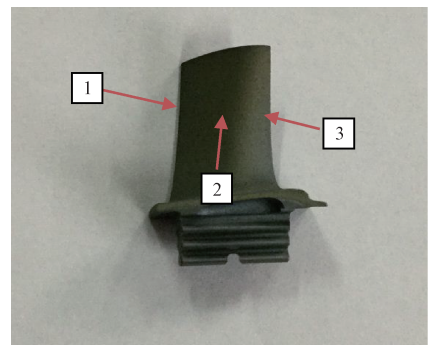
小波分析具有多尺度和平移性的特色^[10],是信号处理领域的新途径,可以在任意尺度观察数字信号的时域和频域特征,可以获得较高的时频局域化特征量^[11],并且在信号奇异性分析方面成为可靠的工具^[12]。将原始信号与具有偶对称特性的小波做卷积变换能判断原信号产生突变现象的位置^[13]。Marr小波基由高斯函数构造,是高斯函数的二阶导数,对突变信号更敏感,可以在一定

范围内检测到薄层超声信号的奇异性。对涂层时域信号数据进行一定尺度的连续小波变换,选取的小波基函数为Marr小波。通过得出连续小波变换各尺度对应的小波系数值后,可以进一步求取小波系数模极大值点的位置以及提取该位置对应的小波模极大系数值。部分采样点在某些尺度上没有小波模极大值,因此在单尺度下用比较小波系数模极大值大小的方法来检测信号突变点位置不够准确判断真实突变点位置。本文研究采用对各尺度上的小波系数模极大值求均值来判断信号突变点的位置,然后进一步计算检测到薄层的厚度。

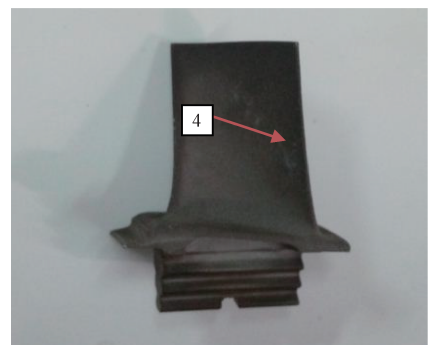
3 叶片涂层厚度超声测量

3.1 试样选取

本文选取如图2所示的共3个叶片进行涂层的厚度测量,分别编号为1#~3#,每个叶片分别选取图2(a)中叶背1、2、3三个区域,图2(b)中叶盆区域4进行超声信号采集,并获得测量的厚度。



(a) 叶背1、2、3三个区域
(a) Three regions from back of blade 1, 2, 3



(b) 叶盆区域4
(b) Area 4 of blade basin

图2 NiCoCrAlYTa 涂层叶片

Fig.2 The blade of NiCoCrAlYTa coating

3.2 超声水浸信号采集换能器

聚焦探头的优点为声束窄、灵敏度高、信噪比高等。为减小超声波在被检叶片中的散射,实验选择聚焦换能

器^[14]。超声波换能器频率的不同会引起检测灵敏度、分辨力等一定程度的差异。本次检测实验的探头选用水浸聚焦探头。探头型号为 I10P6CF30,该探头的中心频率为 10 MHz,晶片直径为 6 mm,焦距为 30 mm。

3.3 超声水浸采集的时域信号

如图 3 为水浸探头采集的涂层试样超声波时域信号数据,试验采样频率选择 500 MHz/s。由于涂层较薄,以及叶片和六元涂层声阻抗差异不够大,涂层的反射波在表面波中产生混叠,因此需要对表面波和一次底波之间的超声信号进行数字信号处理,提取突变点信息。

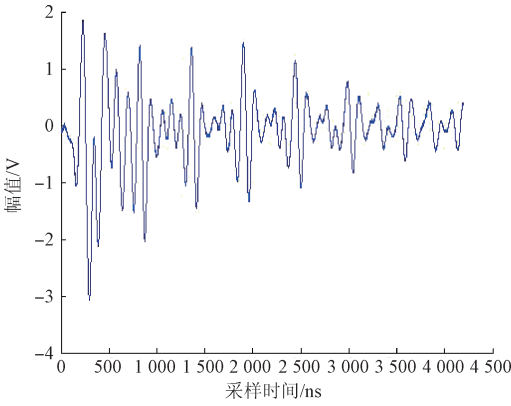


图 3 超声波时域信号

Fig. 3 The ultrasonic time domain signal

3.4 基于 MATLAB 的信号处理涂层测厚

将涂层试样时域信号数据截取部分(包含试样表面信息及底部信息之间)导入 MATLAB 信号处理软件,对叶片涂层时域信号数据进行尺度为 32 的连续小波变换,返回值包含了在各尺度下的小波系数。计算出每个采样点位置所对应的 32 尺度的小波系数极大值的平均值,即可得到图 4 的小波模极大值均值图^[15]。根据以上分析制定代码,制作成小波测厚工具箱,输入采集的时域信号后,直接得到小波模极大值均值图。

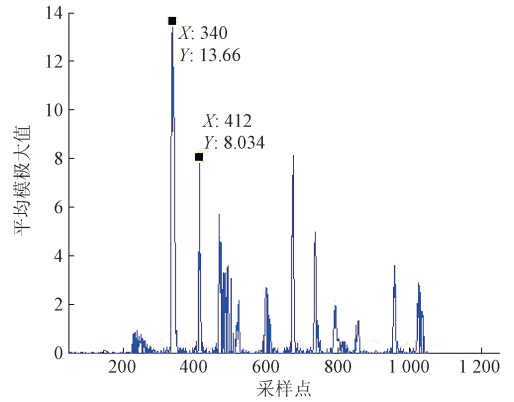


图 4 小波模极大值均值图

Fig. 4 The mean value of wavelet modulus maxima

如图 2 为实验需要测量的涂层叶片。分别对叶片的一定区域进行超声信号提取,实验需要提取的数据部分为表面波至一次底波之间的超声信号。当信号处于——叶片表面界面和涂层——基体界面,通过小波变换数字信号处理编写的代码,获得小波模极大值均值图找到突变的时间间隔,即第 1 个模极大值最高突变峰位置和其后相邻的第 2 个高突变峰位置的时间间隔,由于采样率 500 MHz/s,时间间隔应为 $2\Delta N$ ns,利用式(1)就可以得到涂层厚度。根据相关数据,该六元涂层声速平均取 2 600 m/s。

$$d = v \cdot \Delta N / f \tag{1}$$

式中: d 表示涂层厚度, f 表示信号采样频率, v 涂层声速, ΔN 为采样点个数差值。

3.5 信号数据处理结果

根据小波变换求取涂层厚度方法,在 3 个叶片每 4 个采样区域内随机选取 6 个采样点时域信号对其进行处理,得到模极大值均值图,从中求取该位置突变点时间间隔,即第 1 个和第 2 个最高峰的时间间隔。计算出该点涂层厚度,其中 ΔN 为时间间隔点, d 为涂层厚度(部分测量结果如表 1 所示),可以得出超声测量的涂层厚度也较为均匀。

表 1 叶片小波变换测厚结果

Table 1 Thickness measurement results from wavelet transform

采样位置	1 区域试样 ΔN	1 区域试样 $d/\mu\text{m}$	2 区域试样 ΔN	2 区域试样 $d/\mu\text{m}$	3 区域试样 ΔN	3 区域试样 $d/\mu\text{m}$	4 区域试样 ΔN	4 区域试样 $d/\mu\text{m}$
1	60	156	62	161.2	66	178.2	71	184.6
2	62	161.2	60	156	67	180.9	70	182
3	61	158.6	61	158.6	65	175.5	71	184.6
4	62	161.2	62	161.2	66	178.2	70	182
5	56	145.6	60	156	68	183.6	69	179.4
6	60	156	63	163.8	67	180.9	70	182

4 叶片涂层厚度金相测量分析

4.1 试样制作

将叶片试样时域信号采集区域进行线切割解剖,已切割试样采用镶嵌粉镶嵌。如图5所示镶嵌试样,镶嵌后对横断面进行研磨、抛光和显微镜观察。

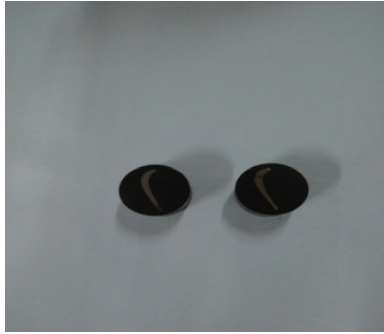


图5 镶嵌试样图

Fig. 5 The map of mosaic specimen

4.2 测量结果

图6所示为试样涂层在金相显微镜下放大100倍图像,由图观察涂层与基体分界明显,涂层厚度较为均匀。按照图3三块试样每个选取1、2、3、4四个区域,每个区域取6个点测量涂层的厚度,通过计算,涂层的平均厚度在130~200 μm的范围内。如表2为金相测量结果。

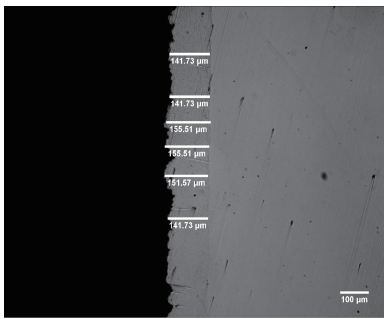


图6 叶片涂层金相图

Fig. 6 The Metallograph of the coating on the blade

表2 金相法测厚结果

Table 2 The results from metallographic analysis for thickness measurement

标号	1 区域试样 厚度/μm	2 区域试样 厚度/μm	3 区域试样 厚度/μm	4 区域试样 厚度/μm
1	156.67	160.8	170.2	178.6
2	159.42	160.05	175.04	176.05
3	157.2	160.28	172.6	177.5
4	159.8	163.38	176	172.6
5	144.71	160.2	177.6	167.42
6	156.67	164.7	176	175.6

5 涂层厚度金相测量和超声测量结果分析

5.1 测量结果比较

测量结果通常以金相测量厚度值为真实标准,如表3为两种方法各涂层试样测厚比较,以及3块叶片试样各区域小波变换相对真实厚度值的平均厚度误差。对金相测量平均厚度值与小波变换测量平均值进行线性相关性分析,图7所示,并得到在97%置信度上线性相关。

表3 两种方法各涂层试样测厚比较

编号	位置	金相平	金相标	小波变换	小波变	小波变换的
		均厚度 $d_1/\mu\text{m}$	准偏差 δ_1	平均厚度 $d_2/\mu\text{m}$	换标准 偏差 δ_2	平均厚度误 差/%
1#	1 区域	155.75	3.00	156.43	5.79	0.44
	2 区域	161.57	3.62	159.47	3.15	1.30
	3 区域	174.57	2.24	179.55	2.83	2.85
	4 区域	174.63	3.12	182.43	1.97	4.47
2#	1 区域	155.31	5.02	156	5.45	0.20
	2 区域	153.41	3.81	155.13	5.85	1.12
	3 区域	159.75	3.56	163.37	3.04	2.27
	4 区域	190.77	3.36	192.05	2.12	0.67
3#	1 区域	155.31	3.00	156.43	3.46	0.72
	2 区域	154.07	3.62	158.17	1.96	2.67
	3 区域	133.99	2.24	134.33	3.91	0.25
	4 区域	158.41	2.74	160.77	4.17	1.49

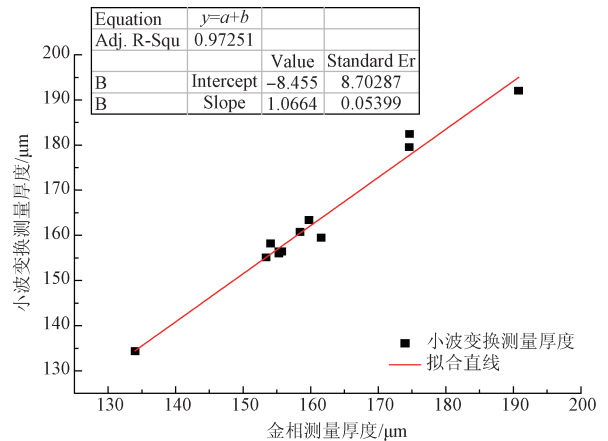


图7 金相检测涂层厚度和超声小波变换检测涂层厚度相关性

Fig. 7 The relativity of the metallographic measured coating thickness and the ultrasonic wavelet transform measured coating thickness

5.2 叶片六元涂层厚度测量误差分析

通过比较,小波变换测量的涂层厚度和真实的厚度

基本一致,误差范围在5%以内,但仍然存在一定的测量误差。

1) 由于涂层厚度本不均匀,金相试样上的厚度读取也存在人为偶然误差,金相每个区域测量的标准偏差都超过了1%,因此会给实验数据有误差。

2) 小波分析测厚原理均检测突变点间隔,且间隔点个数仅以整数形式表示。根据信号采样频率及涂层声速求得一个间隔点所带来的误差为 $5.2\ \mu\text{m}$,对于微米级涂层测厚这个误差不容忽视。

3) 每个叶片1区域由于曲率较小,相对其他区域较为平缓,所以误差相对较小,平均厚度误差不超过1%,但其他区域的测量并不稳定。叶片本身上下面曲率变化大,信号采集困难,也就造成了本区域个别采样点涂层厚度超声测量的误差大。

4) 声速对涂层厚度的准确性较为关键。但受到喷涂工艺,材料本身组织不均匀等因素的影响实际声速每个位置声速不会完全保持一致。

6 结 论

利用小波变换数字信号处理方法分离超声信号传播在界面处的突变信号点和寻找突变点间的时间间隔方法可以准确测量涡轮叶片上的NiCoCrAlYTa涂层厚度,测量相对误差在5%以内。叶片曲率越小,厚度测量越准确,本文提出的叶片涂层厚度超声无损测量方法可以直接用于叶片涂层生产中涂层厚度的快速检测

参考文献

- [1] VIJAY K, BALASUBRAMANIAN K. Processing and design methodologies for advanced and novel thermal barrier coatings for engineering applications [J]. Particuology, 2016, 27(8): 1-28.
- [2] PEREIRA J C, ZAMBRANO J C, TOBAR M J, et al. High temperature oxidation behavior of laser cladding MCrAlY coatings on austenitic stainless steel [J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 270 (5): 243-248.
- [3] LIU X, AN Y L, ZHAO X Q, et al. Hot corrosion behavior of NiCoCrAlYTa coating deposited on Inconel alloy substrate by high velocity oxy-fuel spraying upon exposure to molten V2O5-containing salts [J]. Corrosion Science, 2016, 112(11): 669-709.
- [4] TAO C, WANG L, HUANG S D, et al. Thermal shock resistances of AlO-CrO/NiCoCrAlYTa and AlO/NiCoCrAlYTa coatings deposited by atmosphere plasma

spraying [C]. Recent Advances in Structural Integrity Analysis-Proceeding of the International Congress APCFS/SIF-2014, 2014: 529-533.

- [5] BU CH W, TANG Q J, LIU Y L, et al. Quantitative detection of thermal barrier coating thickness based on simulated annealing algorithm using pulsed infrared thermography technology [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 99(4): 751-755.
- [6] 陶胜杰,杨正伟,张炜,等.基于热图序列时间特征的涂层厚度测量研究[J]. 仪器仪表学报,2014,35(8): 1810-1816.
- TAO SH J, YANG ZH W, ZHANG W, et al. Research on measurement of coating thickness based on thermal image time characteristic [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1810-1816.
- [7] 赵扬. 超声体波声压反射系数谱表征表面涂层研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010: 3-4.
- ZHAO Y. Characterization of surface coating by ultrasonic wave acoustic pressure reflection coefficient spectrum characterization of surface coatings [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010: 3-4.
- [8] 杨玉娥,赵东,安延涛,等.微波检测热障涂层孔隙率的可行性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 36(6): 1215-1219.
- YANG Y, ZHAO D, AN Y T, et al. the feasibility study about microwave detection of thermal barrier coating porosity [J]. Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 36 (6): 1215-1219.
- [9] ANGRISANI L, BACCIGALUPI A, MORIELLO R S L. Ultrasonic time-of-flight estimation through unscented Kalman filter [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006(8): 1077-1084.
- [10] 王竹霞,臧顺金.基于小波模极大值的信号奇异性检测[J]. 电脑知识与技术:学术交流, 2007, 3(14): 484.
- WANG ZH X, ZANG SH J. The singularity detection of signal based on wavelet modulus maxima [J]. Computer Knowledge and Technology: Academic Exchange, 2007, 3(14): 484.
- [11] 王冬冬,田干,杨正伟,等.基于小波分解灰关联的热波检测图像增强[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 1086-1088.
- WANG D D, TIAN G, YANG ZH W, et al. The enhanced thermal wave image based on wavelet decomposition grey correlation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (5): 1086-1088.
- [12] 林莉,徐志辉,李喜孟,等.表面涂层厚度超声测量方法研究[C]. 第九届全国无损检测新技术学术研讨

会, 2007.

LIN L, XU ZH H, LI X M, et al. Study on the ultrasonic measurement method of surface coating thickness [C]. 9th National Symposium on Nondestructive Testing of New Technology, 2007.

- [13] 张德丰. MATLAB 小波分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2009: 308-309.
ZHANG D F. MATLAB Wavelet Analysis [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2009: 308-309.
- [14] 靳世久, 杨晓霞, 陈世利, 等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 925-934.
JIN SH J, YANG X X, CHEN SH L, et al. Development and application of ultrasonic phased array testing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2014, 28 (9): 925-934.
- [15] 陈洁, 余诗诗, 李斌, 等. 基于双阈值比较法超声波流量计信号处理[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(11): 1024-1032.
CHEN J, YU SH SH, LI B, et al. The double threshold comparison method of ultrasonic flowmeter signal processing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27 (11): 1024-1032.

作者简介



刘柯, 2011 年于南昌航空大学获得学士学位, 现为南昌航空大学硕士研究生, 主要研究方向为无损检测及仪器。

E-mail: mengkesijiu@163.com

Liu Ke received B. Sc. from Nanchang Hangkong University in 2011. Now he is a M. Sc. candidate in Nanchang Hangkong University. His main research interest includes nondestructive testing and instruments.



邬冠华, 分别在 1983 年和 1986 年于北京航空学院获得学士和硕士学位, 现为南昌航空大学教授、中国无损检测学会射线专业委员会主任、江西省无损检测学会理事长、江西省中青年学科带头人, 主要研究方向无损检测仪器、射线检测、计算机控制技术等。

E-mail: wuguanhua@nchu.edu.cn

Wu Guanhua received M. Sc. and M. Sc. from Beijing Aviation University in 1983 and 1986, respectively. He is now a professor in Nanchang Hangkong University, the director of Radiographic Testing Specialized Committee in China Society for Nondestructive Testing. His main research fields include nondestructive testing instrument, X-ray detection, and computer control technology, etc.