

复合材料结构超声检测的不确定度评定

史俊伟, 刘松平, 傅天航

(中航复合材料有限责任公司 检测与评估研究室, 北京 101300)

摘要: 超声检测技术对缺陷的定位和定量检测有高精度性和高可靠性, 其已在复合材料结构的检测领域得到十分广泛的应用。为了评定检测结果的质量, 需要对复合材料结构超声检测的不确定度进行评定, 以表征检测结果的可信度。基于超声反射法对碳纤维增强复合材料检测试块中不同尺寸的平底孔缺陷进行定量检测, 采用底波幅值衰减 6 dB 的方法对缺陷边界进行标定, 得到检出缺陷的尺寸, 建立了不确定度传递的数学模型, 分析了对检测结果产生影响的因素, 包括试块、扫查方法、设备参数以及检测重复性等, 给出了复合材料结构超声检测的不确定度评定结果。

关键词: 不确定度; 复合材料结构; 超声检测; 缺陷

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2020)01-0056-05

Evaluation of uncertainty by ultrasonic testing for composite structures

SHI Junwei, LIU Songping, FU Tianhang

(Testing and Evaluation Laboratory, AVIC Composite Corporation Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: Ultrasonic testing (UT) has been proven to be a high-accuracy and high-reliability Nondestructive testing (NDT) method for determining defect in composite structures, such as its size, location, depth etc. While enjoying widespread application, UT is now considered to be interpreted from the view point of uncertainty. This paper aims to evaluate the uncertainty in UT quantitative assessments for composites defect size. Ultrasonic pulse-echo method was performed on composite test block made of CFRP with flat-bottom holes of different diameters. The geometry of defect was determined by referring to bottom signal amplitude, which would attenuate by 6 dB. Various factors, including the test block, scanning method, instrument parameters, as well as the repeatability, have been taken into consideration. This paper also covers the methods and steps of the evaluation of uncertainty in defect determination by UT.

Key words: uncertainty; composite structure; ultrasonic testing; defect

超声检测是控制和保证碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)质量的主要检测方法, 其基于材料内部缺陷或不均匀性所引起的声波变化, 来判断和检测缺陷是否存在及缺陷的性质、深度和尺寸等^[1]。近年来, 复合材料的超声检测技术从以往只注重缺陷检出, 逐步向定性检出和定量评定的无损检测与评估(Nondestructive Testing & Evaluation, NDT&E)

方向发展。因此, 对复合材料内部缺陷准确地、可靠地定量检测, 对于复合材料结构的可靠性、安全性及服役寿命的预测和评价尤为重要^[2]。

在以往的检测工作中, 通常采用“误差”来表述超声检测结果的准确性与可靠性, 误差表明被检测估计值偏离参考量值的程度, 但随着人们对复合材料超声检测认识的不断深入, 仅以“误差”表述检测结果通常是不清晰的, 所以在复合材料超声检测中引入“不确定度”来定量表征系统误差和重复性随机误差在一定置信概率范围内对检测结果的综合影响程度, 不确定度表明测量值的分散性, 以“不确定度”作为超声检测结果质量的评定指标, 表征检测结果的可信赖程度^[3-5]。

收稿日期: 2019-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61571409)

作者简介: 史俊伟(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事复合材料及焊接无损检测技术的研究与应用

通信作者: 刘松平, liuspjng@163.com

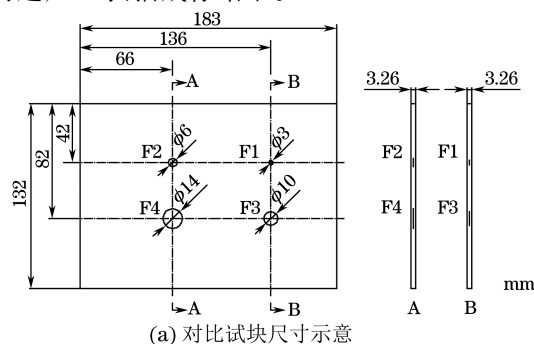
复合材料的超声检测不同于金属材料的超声检测,金属材料通常采用距离-幅度曲线(DAC)法表示其缺陷的当量尺寸,不确定度的评定也是基于当量的方法^[6-7];对于复合材料,通常采用超声反射法^[8]或超声穿透法^[9]检出缺陷边界再进行尺寸的测定,或者采用多种成像模式相结合的方式表征复合材料内部缺陷^[10-11],但是从不确定度的角度评定缺陷尺寸检测结果的质量相关方面的研究较少,ANGELIKA^[12]采用超声反射法和超声相控阵对复合材料缺陷进行检测和不确定度评定,ANIS^[13]从检测仪器的角度分析了不同检测参数对缺陷检出概率曲线(POD)和不确定度的影响。

笔者以 CFRP 复合材料的超声反射法无损检测为例,对内部预制的模拟分层缺陷进行定量检测,采用超声 6 dB 法检出并标记缺陷区域,分析超声检测过程中的不确定度来源及其分量对检测结果的影响程度,对复合材料中缺陷尺寸的超声检测结果进行不确定度评定。

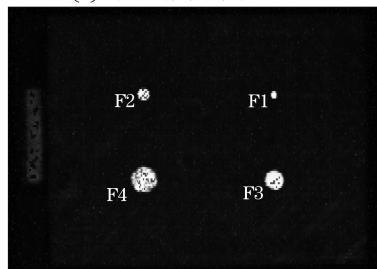
1 试验材料及方法

1.1 对比试块

对比试块尺寸示意如图 1(a)所示,材料为 T300/QY8911,采用热压罐成型工艺和准各向层压板结构,尺寸(长×宽)为 183 mm×132 mm,厚度为 3.26 mm,在非检测面预制平底孔以模拟分层缺陷,孔直径分别为 3,6,10,14 mm,图 1(b)为对比试块的超声 C 扫描成像结果。



(a) 对比试块尺寸示意



(b) 对比试块 C 扫描成像结果

图 1 检测对比试块尺寸示意及其 C 扫描成像结果

1.2 检测设备与计量器具

复合材料超声检测设备型号为 FCC-B, 聚焦换能器型号为 FJ-1, 中心频率为 5 MHz, 晶片直径为 30 mm, 焦距为 50 mm, 焦柱直径为 0.5 mm。计量器具为钢板尺, 其最小刻度为 0.5 mm。

试验温度为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $(50\% \pm 5\%) \text{ RH}$ 。

1.3 检测方法

采用超声反射法对对比试块中模拟分层缺陷进行检测, 根据超声 6 dB 法确定缺陷边界, 即以无缺陷处底波幅值为基准, 从无缺陷区向缺陷区移动换能器, 当底波幅值降低 6 dB 时标记缺陷边界点 P_i ($i=1, 2, 3, \dots$), 将各边界点相连, 得到缺陷区域的轮廓包络, 超声 6 dB 法确定缺陷边界示意如图 2 所示。将检出缺陷区域相距最远的两个边界点间的距离定义为长度 x , 将垂直于长度 x 方向的相距最远的两个边界点间的距离定义为 y , 计算缺陷尺寸, 按 $\phi 3, \phi 6, \phi 10, \phi 14 \text{ mm}$ 分 $m=4$ 组, 每组重复 $n=5$ 次, 记录缺陷长度 x 、宽度 y , 缺陷尺寸的超声检测结果由 $m=4$ 组、 $n=5$ 次重复检测的平均值给出。

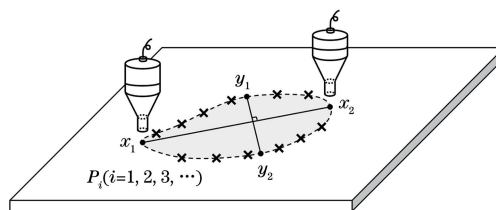


图 2 超声 6 dB 法确定缺陷边界示意

2 建立数学模型

缺陷尺寸 ϕ 定义为检出缺陷区域长度 x (输入量) 与宽度 y (输入量) 的关系输出量, 其表示式为

$$\phi = (x + y) / 2 \quad (1)$$

x_1, x_2, y_1, y_2 为若干边界点 P_i ($i=1, 2, 3, \dots$) 中提取的 4 个典型标记点, 距离 $\overline{x_1 x_2}$ 与 $\overline{y_1 y_2}$ 分别为缺陷区域长度 x 与宽度 y (见图 2)。

组合类似影响因素, 将输入量 x 与 y 重复性因素组合在一起, 归入输出量 ϕ 的重复性因素, 因此不需分别评定输入量 x 与 y 重复性引入的不确定度分量, 而是直接评定检测结果 ϕ 的重复性引入的不确定度分量。将式(1)改写为

$$\phi = \frac{\overline{x_1 x_2} + \overline{y_1 y_2}}{2} \times f_{\text{rep}}(x, y) \quad (2)$$

式中: f_{rep} 为测量重复性影响因素的修正因子, 其数值为 1。

边界点间距离 $\overline{x_1 x_2}$ 与 $\overline{y_1 y_2}$ 为缺陷区域边界点

$P_i (i=1,2,3,\dots)$ 的函数关系量,因此用简化的方式计算缺陷尺寸 ϕ 的合成标准不确定度为

$$u(\phi) = \{[c_1 u(P_i)]^2 + [c_2 u(x)]^2 + [c_3 u(y)]^2 + [c_4 u(f_{\text{rep}})]^2\}^{1/2} \quad (3)$$

式中:灵敏度系数 $c_1 = 1, c_2 = 1, c_3 = 1, c_4 = 1$; $u(P_i)$ 为缺陷区域边界点 $P_i (i=1,2,3,\dots)$ 标定的标准不确定度; $u(x)$ 为长度 x 的标准不确定度; $u(y)$ 为宽度 y 的标准不确定度; $u(f_{\text{rep}})$ 为缺陷尺寸 ϕ 检测重复性引起的标准不确定度。

3 不确定度来源分析

表 1 给出了不确定度来源及相关信息,输出量缺陷尺寸的不确定度来源有 4 个方面。

(1) 缺陷区域边界点 $P_i (i=1,2,3,\dots)$ 标定的标准不确定度 $u(P_i)$ 。包含 2 个来源:一是超声检测仪器灵敏度引入的标准不确定度分量 $u_1(P_i)$;

二是采用超声 6 dB 法标定缺陷区域边界点时所引入的标准不确定度分量 $u_2(P_i)$ 。

(2) 缺陷区域长度 x 的标准不确定度 $u(x)$ 。包含 3 个来源:一是测量边界点间距 $\overline{x_1 x_2}$ 引入的标准不确定度分量 $u_1(x_{\text{rep}})$;二是标准试块模拟缺陷尺寸公差的不确定度分量 $u_2(\phi_{\text{sample}})$;三是钢板尺分辨力示值误差引入的标准不确定度分量 $u_3(\overline{x_1 x_2})$ 。

(3) 缺陷区域长度 y 的标准不确定度 $u(y)$ 。包含 3 个来源:一是测量边界点间距 $\overline{y_1 y_2}$ 引入的标准不确定度分量 $u_1(y_{\text{rep}})$;二是标准试块模拟缺陷本身尺寸的不确定度分量 $u_2(\phi_{\text{sample}})$;三是钢板尺分辨力示值误差引入的标准不确定度分量 $u_3(\overline{y_1 y_2})$ 。

(4) 缺陷尺寸 ϕ 检测重复性引起的标准不确定度 $u(f_{\text{rep}})$ 。边界点间距 $\overline{x_1 x_2}, \overline{y_1 y_2}$ 测量重复性所引入的标准不确定度,归入缺陷尺寸 ϕ 的重复性 $u(f_{\text{rep}})$ 中考虑。

表 1 超声检测模型的不确定度输入量

不确定度来源	类型	概率分布	包含因子	标准不确定度
超声检测仪器灵敏度引入的标准不确定度分量	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u_1(P_i)$
采用超声 6 dB 法标定缺陷区域边界点时所引入的标准不确定度分量	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u_2(P_i)$
缺陷区域边界点 $P_i(i = 1,2,3,\cdots)$ 标定的相对合成标准不确定度	合成	—	—	$u(P_i)$
测量边界点间距 $\overline{x_1x_2}$ 引入的标准不确定度分量(归入 f_{rep})	A	正态	1	$u_1(x_{\text{rep}})$
标准试块模拟缺陷尺寸的不确定度分量	B	三角	$\sqrt{6}$	$u_2(\phi_{\text{sample}})$
钢板尺分辨力示值误差引入的标准不确定度分量	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u_3(\overline{x_1x_2})$
缺陷区域长度 x 测定的相对合成标准不确定度	合成	—	—	$u(x)$
缺陷区域宽度 y 测定的相对合成标准不确定度	合成	—	—	$u(y)$
测量重复性引起的相对标准不确定度	A	正态	1	$u(f_{\text{rep}})$
缺陷尺寸 ϕ 检测结果合成标准不确定度	$u(\phi) = \sqrt{u^2(P_i) + u^2(x) + u^2(y) + u^2(f_{\text{rep}})}$			
缺陷尺寸 ϕ 的检测结果为 $\bar{\phi}$, 由 $m = 4$ 组, $n = 5$ 次的平均值给出				
相对扩展不确定度 U_{ref} , 相对合成标准不确定度 $u(\phi)$, 包含因子 $k(\phi) = 2$, 对应置信水平均为 95%				

4 输入量的标准不确定度评定

4.1 缺陷边界点的标准不确定度评定

缺陷边界点 $P_i (i=1,2,3,\dots)$ 标定引入的标准不确定度 $u(P_i)$, 包括 2 个来源:一是超声检测仪器灵敏度引入的标准不确定度分量 $u_1(P_i)$;二是超声 6 dB 法标定缺陷区域边界点方法所引入的标准不确定度分量 $u_2(P_i)$ 。

4.1.1 由超声检测仪器灵敏度引入的不确定度

经中国计量科学研究院测试, FCC-B-1 超声检测仪器的衰减误差/准确度等级为 $(0.5\%A \pm 0.02)$ dB, A 为衰减量, dB。

采用超声 6 dB 法进行缺陷区域边界点的标定,

则衰减量 $A=6$ dB, 可知其最大允许衰减误差为 $\Delta(0.5\%A \pm 0.02)_{\text{max}}$, 服从均匀分布, 区间半宽度为 $a_{\Delta 1}=0.05$ dB, 包含因子 $k_{\Delta 1}=\sqrt{3}$ 。因此引起的标准不确定度分量 $u_1(P_i)$ 为 0.035 dB。

4.1.2 由超声 6 dB 法引入的不确定度

经中国计量科学研究院测试, 型号为 FCC-B-1 超声检测仪器的垂直线性误差为 3.5%, 该系列超声检测仪器的最大允许垂直线性误差为 5%, 采用超声 6 dB 法所引入的最大垂直线性误差 $\Delta d_{\text{max}} = \pm 0.3$ dB。

服从均匀分布, 区间半宽度为 $a_{\Delta d} = 0.3$ dB, 包含因子 $k_{\Delta d} = \sqrt{3}$ 。因此引起的标准不确定度分量 $u_2(P_i)$ 为 0.173 dB。

4.1.3 缺陷边界点的相对合成标准不确定度 $u(P_i)$

不确定度分量 $u_1(P_i)$ 与 $u_2(P_i)$ 互不相关,缺陷边界点 $P_i(i=1,2,3,\dots)$ 标定的合成标准不确定度为

$$u(P_i) = \sqrt{u_1^2(P_i) + u_2^2(P_i)} = 0.177 \text{ dB} \quad (4)$$

采用超声 6 dB 法标定缺陷边界点 $P_i(i=1,2,3,\dots)$ 的相对合成标准不确定度 $u_{\text{rel}}(P_i)$ 为

$$u_{\text{rel}}(P_i) = \frac{u(P_i)}{P_{6 \text{ dB}}} = 2.95\% \quad (5)$$

4.2 缺陷长度 x 测定的标准不确定度

4.2.1 测量边界点间距 $\overline{x_1 x_2}$ 引入的标准不确定度分量

测量边界点间距 $\overline{x_1 x_2}$ 的重复性归入缺陷尺寸 ϕ 的重复性 f_{rep} 中,故此处不评定。

4.2.2 标准试块模拟缺陷尺寸的不确定度分量

经测试,试块平底孔直径最大允许误差(MPE)为 $1.9 \mu\text{m}$,电荷耦合元件(CCD)引入的误差为 $0.3 \mu\text{m}$,服从三角分布,其区间半宽度 $a_2 = 2.2 \mu\text{m}$,包含因子 $k_2 = \sqrt{6}$,因此标准试块模拟缺陷尺寸误差引起的标准不确定度 $u_2(\phi_{\text{sample}})$ 为 $0.90 \mu\text{m}$ 。

4.2.3 钢板尺分辨力引入的标准不确定度分量

钢板尺示值分辨力 $\epsilon = 0.5 \text{ mm}$,服从均匀分布,其区间半宽度 $a_3 = 0.25 \text{ mm}$,包含因子 $k_4 = \sqrt{3}$,因

此引起的标准不确定度分量为

$$u_3(\overline{x_1 x_2}) = a_3/k_4 = 0.145 \text{ mm} \quad (6)$$

4.2.4 缺陷长度 x 测定的相对合成标准不确定度 $u(x)$

不确定度分量 $u_2(\phi_{\text{sample}})$ 和 $u_3(\overline{x_1 x_2})$ 互不相关,缺陷区域长度 x 的合成标准不确定度可采用平方根和方法合成得到

$$u(x) = \sqrt{u_2^2(\phi_{\text{sample}}) + u_3^2(\overline{x_1 x_2})} = 0.145 \text{ mm} \quad (7)$$

缺陷区域长度 x (按不同的模拟分层缺陷)测定的相对合成标准不确定度 $u_{\text{rel}}(x)$ 分别为

$$u_{\text{rel}}(x_{\phi=3 \text{ mm}}) = \frac{u(x)}{x_{\phi=3 \text{ mm}}} = 4.83\% \quad (8)$$

$$u_{\text{rel}}(x_{\phi=6 \text{ mm}}) = \frac{u(x)}{x_{\phi=6 \text{ mm}}} = 2.41\% \quad (9)$$

$$u_{\text{rel}}(x_{\phi=10 \text{ mm}}) = \frac{u(x)}{x_{\phi=10 \text{ mm}}} = 1.45\% \quad (10)$$

$$u_{\text{rel}}(x_{\phi=14 \text{ mm}}) = \frac{u(x)}{x_{\phi=14 \text{ mm}}} = 1.04\% \quad (11)$$

4.3 缺陷宽度 y 测定的标准不确定度

根据检测方法及数学模型所列出的各不确定度分量来源,缺陷区域宽度 y 与缺陷区域长度 x 两者测定的标准不确定度应是相同的。

4.4 缺陷尺寸 ϕ 检测重复性引起的标准不确定度

对复合材料标准试块模拟分层缺陷进行检测,共 $m=4$ 组检测值,每组进行 $n=5$ 次缺陷尺寸 ϕ 的检测,检测结果如表 2 所示。

表 2 超声检测的重复性试验结果

mm

尺寸	1	2	3	4	5	均值 $\bar{\phi}$	标准偏差 s_j
$\phi_{3 \text{ mm}}$	x	3.00	3.20	3.10	3.00	3.10	—
	y	3.10	3.00	3.00	3.10	3.00	—
	ϕ	3.05	3.10	3.05	3.05	3.05	0.022
$\phi_{6 \text{ mm}}$	x	6.00	6.10	6.20	6.00	6.10	—
	y	6.10	6.10	6.00	6.20	6.10	—
	ϕ	6.05	6.10	6.10	6.10	6.10	0.022
$\phi_{10 \text{ mm}}$	x	10.00	10.20	10.20	10.10	10.00	—
	y	10.00	10.20	10.00	10.10	10.20	—
	ϕ	10.00	10.20	10.10	10.10	10.10	0.071
$\phi_{14 \text{ mm}}$	x	14.10	14.00	14.20	14.10	14.10	—
	y	14.10	14.00	14.10	14.20	14.00	—
	ϕ	14.10	14.00	14.15	14.15	14.05	0.065

缺陷尺寸 ϕ 的检测结果 $\bar{\phi}$ 分别为 3.06, 6.09, 10.10, 14.09 mm, 标准不确定度分别为 0.022, 0.022, 0.071, 0.065 mm, 由 $m=4$ 组, $n=5$ 次的检测平均值给出。

由超声检测的重复性试验所引入的相对不确定度为

$$u_j(f_{\text{rep}}) = \frac{s_j}{\bar{\phi}_j} \times 100\% \quad (12)$$

所以,标准试块中4个模拟缺陷由检测重复性引入的缺陷尺寸 ϕ 的相对不确定度分别为0.71%,0.36%,0.70%,0.46%,自由度 $\nu=4$ 。

5 缺陷尺寸 ϕ 的不确定度评定

缺陷尺寸 ϕ 的相对合成标准不确定度为

$$u_{\text{rel}}(\phi) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(P_i) + u_{\text{rel}}^2(x) + u_{\text{rel}}^2(y) + u_{\text{rel}}^2(f_{\text{rep}})} \quad (13)$$

针对复合材料标准试块中不同模拟缺陷的检测结果 $\bar{\phi}$,其 $u_{\text{rel}}(\phi)$ 分别为7.47%,4.52%,3.66%,3.33%,对应的 $u(\phi)$ 分别为0.23,0.28,0.37,0.47 mm。

取包含因子 $k(\phi)=2$,包含概率 $p \approx 95\%$,则缺陷尺寸 ϕ 检测结果的相对扩展不确定度 U_{rel} 为

$$U_{\text{rel}} = k(\phi) \times u_{\text{rel}}(\phi) \quad (14)$$

缺陷尺寸 ϕ 的检测结果的相对扩展不确定度 U_{rel} 分别为14.95%,9.04%,7.32%,6.66%,是由相对合成标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\phi)$ 乘以包含因子 $k(\phi)=2$ 给出的,提供大约95%的包含概率。

6 结论

采用超声反射法检测复合材料结构的内部缺陷,对检测结果的影响因素进行了分析,得到检出缺陷尺寸的不确定度评定,这对评价无损检测结果的可靠性具有重要意义。

(1) CFRP复合材料缺陷的超声检测结果的不确定度评定分为A类不确定度评定和B类不确定度评定,其中A类不确定度评定来自于检测试验结果的统计分布,由重复性试验结果的标准偏差进行表征;B类不确定度评定是考虑仪器、方法和试块等多种因素所引入的不确定分量。

(2) 不确定度的评定可以评价检测结果的可靠性,不确定度越小,所得的检测结果与被检测缺陷尺寸的真值越接近,采用的检测方法水平越高,检测结果的可信赖程度越高。

(3) 不确定度的评定可以增强检测结果之间的可比性。例如,采用文中所述的检测方法,对CFRP复合材料实施超声检测,按照检测灵敏度为 $\phi 3 \text{ mm}$,其检测结果的不确定度为0.23 mm,相对扩展不确

定度为15%,如果两次检测结果相差在15%以内,则认为缺陷尺寸无显著变化。

(4) CFRP复合材料缺陷超声检测的影响因素较多,其不确定度评定应考虑材料、结构、检测方法、缺陷性质、检测灵敏度等对检测结果的影响。

参考文献:

- [1] 张小海,李坚.材料无损检测中的测量不确定度评定[J].南昌航空工业学院学报(自然科学版),2005(3):28-31.
- [2] 吴益文,李文涛,华沂.复合材料-巴氏硬度测量不确定度分析与评定[J].玻璃钢/复合材料,2010(4):42-45.
- [3] JJF 1059-2012 测量不确定度评定与表示[S].
- [4] JJF 1001-2011 通用计量术语及定义[S].
- [5] 卢伟.薄壁管涡流检测的不确定度评定[J].无损检测,2018,40(6):47-51.
- [6] 王海岭.超声波探伤不确定度的评定[J].无损检测,2005,27(2):65-67.
- [7] 董政,史朝刚,刘晓磊,等.超声波探伤不确定度评定[J].物理测试,2017,35(6):54-57.
- [8] 刘松平,刘菲菲,傅天航,等.复合材料结构中R区超声反射信号特征及其检测应用[J].无损检测,2016,38(12):1-5,64.
- [9] 章清乐,李宏.复合材料气瓶超声穿透C扫描检测技术[J].玻璃钢/复合材料,2012(4):121-123.
- [10] 史俊伟,刘松平,程文礼.复合材料蜂窝夹层结构制件的超声可视化无损检测[J].无损检测,2015,37(3):39-43,46.
- [11] 刘松平,郭恩明,张谦琳,等.复合材料深度方向超声C扫描检测技术[J].无损检测,2001,23(1):13-15.
- [12] ANGELIKA W, KRZYSZTOF D, KRZYSZTOF L. Assessment of uncertainty in damage evaluation by ultrasonic testing of composite structures[J]. Composite Structures, 2018, 203: 71-84.
- [13] ANIS B A, FRÉDÉRIC J, PIERRE C. Quantifying uncertainty in parameter estimates of ultrasonic inspection system using Bayesian computational framework[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 109: 89-110.