

## 玻璃纤维增强复合材料局部减薄损伤的微波无损定量检测\*

胡金花<sup>1</sup>, 李勇<sup>1</sup>, 谭建国<sup>1</sup>, 陈振茂<sup>1</sup>, 武永卓<sup>2</sup>, 李文嘉<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 航天航空学院 机械结构强度与振动国家重点实验室 陕西省无损检测与结构完整性评价工程技术研究中心, 陕西 西安 710049; 2. 亿科检测认证有限公司, 江苏 昆山 215331)

**摘要:** 由于恶劣的服役环境, 玻璃纤维增强复合材料(GFRP)易遭受外力冲击进而出现材料减薄损伤, 该损伤对结构完整性和安全性构成极大威胁, 因此, 对GFRP减薄损伤实施有效的无损定量检测具有重大意义。集中探究GFRP减薄损伤的微波无损定量检测手段。建立了微波检测GFRP减薄缺陷的二维有限元仿真模型, 仿真研究了减薄缺陷与检测响应信号及其特征的关联规律。搭建了Ka频段(30~40 GHz)微波检测实验平台, 通过矩形开口波导探头对GFRP减薄缺陷进行二维扫描成像, 获取损伤图像。实验结果表明: 微波无损定量检测GFRP减薄缺陷的可行性。

**关键词:** 微波检测; 玻璃纤维增强复合材料; 局部减薄; 反射测定法; 定量评估

**中图分类号:** TP212; TB332; TG45.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-9787(2020)03-0113-04

## Nondestructive quantitative detection of localized thickness loss in GFRP composites via microwave NDT\*

HU Jinhua<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, TAN Jianguo<sup>1</sup>, CHEN Zhenmao<sup>1</sup>, WU Yongzhuo<sup>2</sup>, LI Wenjia<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Shaanxi Engineering Research Centre of NDT and Structural Integrity Evaluation, School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Ego Testing and Certification Co Ltd, Kunshan 215331, China)

**Abstract:** Because of the severe environments, in-service glass fiber reinforced polymer(GFRP) composites is prone to exterior impact. And thus, thickness loss defect appears, which causes serious threats to the integrity and safety of structures. Therefore, it is indispensable to conduct effectively quantitative detection of the thickness loss in GFRP composites with non-destructive testing(NDT) techniques. Microwave NDT for quantitative detection of the thickness loss in GFRP is intensively investigated. A 2D finite element simulation model for detecting GFRP thickness loss by microwave NDT method is set up and applied for analysis of the relationship between the detecting and response signal as well as its feature and the thickness loss defect. Ka-band(30~40 GHz) microwave NDT experimental platform is conducted. In experiments, an open-ended rectangular waveguide probe is used for 2D scanning imaging of defect, damage image is obtained. Experimental results verify the feasibility of quantitative detection of GFRP thickness loss defect in microwave NDT method.

**Keywords:** microwave testing; glass fiber reinforced polymer; localized thickness loss; reflectometry; quantitative evaluation

### 0 引言

玻璃纤维增强复合材料(glass fiber reinforced polymer, GFRP)广泛应用于航空航天、航海、建筑、医学等各领域<sup>[1]</sup>。在复杂、恶劣的服役环境中, GFRP表面易遭受来自外界的冲击, 形成冲击损伤<sup>[2]</sup>, 其典型表现为材料减薄缺陷<sup>[3]</sup>, 该缺陷是GFRP结构失效的主要成因之一。为保障

结构完整性和安全性, 对GFRP实施有效的无损检测至关重要。GFRP的常规无损检测方法包括了超声检测、声发射检测、射线检测、红外热波检测等, 然而, 这些检测方法尚存局限性, 如: 超声检测需接触GFRP表面, 且由于GFRP自身结构特性造成超声场极大衰减, 检测面积有限<sup>[4]</sup>; 声发射检测设备昂贵, 往往需要其他检测方法进行复验<sup>[5,6]</sup>;

收稿日期: 2020-01-06

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51777149, 11927801); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(XJJ2018027); 国家重点研发资助项目(2017YFF0209703)

射线检测不仅耗时且对检测人员健康存在安全隐患<sup>[7]</sup>;由于 GFRP 低导热性,红外热波检测结果精度尚待提升<sup>[8]</sup>。

微波检测采用高频电磁波,相比于其他无损检测方法具有以下优势:非接触检测、检测距离长;对非金属材料(包括 GFRP)穿透能力强;不仅对于层状缺陷(如,脱粘、分层等)有较好的检测精度,对体积型缺陷(如,减薄缺陷等)检测灵敏度亦高;电磁辐射较小,对人体危害低<sup>[9,10]</sup>。随着 GFRP 等复合材料应用领域的扩展,微波检测已成为前景广阔的 GFRP 无损检测方法之一。Ryu C H 等人通过太赫兹时域成像系统反射法,检出 GFRP 的多层分层缺陷<sup>[11]</sup>。Hosoi A 等人利用聚焦透镜传感器,检测出 3 mm 厚 GFRP 板中的 100  $\mu\text{m}$  分层缺陷<sup>[12]</sup>。此外,该学者还通过辨别微波反射计中的信号幅值差异,检测出 GFRP 板中存在的厚度为 7.5  $\mu\text{m}$  的薄膜<sup>[13]</sup>。Wang P 等人提出微波等相位频率截取法,实现 GFRP 中 2.92  $\mu\text{m}$  深界面损伤的定量检测<sup>[14]</sup>。Sutthaweekul R 等人利用主成分分析法和雷达孔径成像实现带涂层 GFRP 管道平底孔缺陷的有效检出<sup>[15]</sup>。

本文集中探究 GFRP 表面减薄缺陷的微波定量检测关键。建立 GFRP 局部减薄缺陷微波检测的二维有限元仿真模型,通过系列仿真,研究 GFRP 减薄缺陷微波检测响应信号特性及其特征。同时,搭建 Ka 频段(30~40 GHz)微波检测实验平台,采用矩形开口波导探头<sup>[16]</sup>对 GFRP 减薄缺陷进行二维扫描成像,进一步探究 GFRP 局部减薄缺陷微波定量检测的可行性。

## 1 仿真研究

考虑到微波检测频段(30~40 GHz)和实验所用长度  $L$  为 214 mm 的矩形开口波导探头孔径尺寸(长边  $a$  为 9.11 mm,短边为 5.56 mm),检测中所激发和接收的微波主模为 TE<sub>10</sub>。结合 TE<sub>10</sub> 波的传输特点以及检测系统三维模型可简化为二维模型的可行性<sup>[17]</sup>,建立基于矩形开口波导的微波检测 GFRP 二维有限元仿真模型,如图 1 所示。模型中,矩形开口波导探头用于激发 Ka 频段的入射微波,同时接收该频段下的反射波。

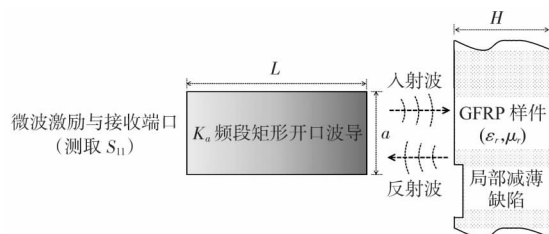


图1 Ka频段微波检测 GFRP 减薄缺陷的二维有限元仿真模型

仿真模型中微波扫频范围设置为 30~40 GHz,探头脱离(探头开口端到 GFRP 表面的距离)为 2 mm,GFRP 标准厚度( $H$ )为 6 mm。仿真中,GFRP 样品相关电磁参数分别设为电导率  $\sigma = 0 \text{ S/m}$ ,相对磁导率  $\mu_r = 1$ ,相对介电常数  $\epsilon_r =$

3.5。仿真计算所求结果为各频率下反射系数( $S_{11}$ )的幅值和相位。图 2(a) 为仿真所得有减薄损伤与无损伤 GFRP 对应的  $S_{11}$  幅值及相位。由图 2 可见, $S_{11}$  的幅值和相位与激励频率密切相关,有减薄缺陷 GFRP 样品与无减薄缺陷 GFRP 样品的  $S_{11}$  幅值和相位存在差异,其中幅值变化尤为明显。因而, $S_{11}$  幅值可用于检测 GFRP 减薄缺陷。

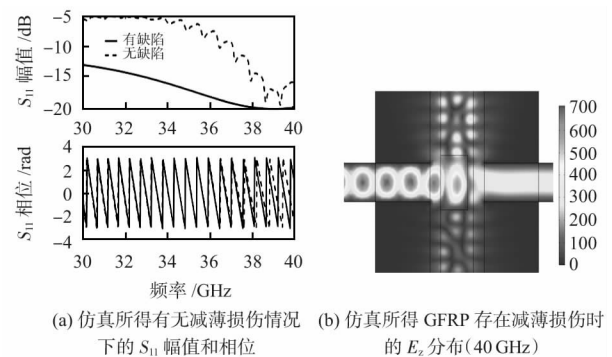


图2 仿真结果

图 2(b) 为 GFRP 存在局部减薄缺陷时,仿真计算所得激励频率为 40 GHz 时电场  $z$  分量 ( $E_z$ ) 分布。由图 2(b) 可见,GFRP 中的电场分布与矩形开口波导探头中的电场分布存在差异,说明电场与 GFRP 结构存在一定特有关系,减薄缺陷进一步造成电场分布的扰动,是导致检测所拾取  $S_{11}$  幅值和相位变化的直接原因。为探究  $S_{11}$  幅值与减薄缺陷尺寸(包括:直径、深度)的关联规律,仿真中,在样品表面设置了直径( $D$ )为 7,10,13 mm,深度( $d$ )为 3,4,5 mm 的 9 个不同尺寸减薄缺陷,以缺陷中心为坐标原点,仿真计算当探头扫略各缺陷(扫查范围为  $-15 \sim 15 \text{ mm}$ ,步长为 0.3 mm)不同位置处的  $S_{11}$  结果,提取在激励频段下  $S_{11}$  平均幅值作为各位置处的检测信号特征,绘制  $S_{11}$  平均幅值-探头位置扫查曲线,如图 3 所示。

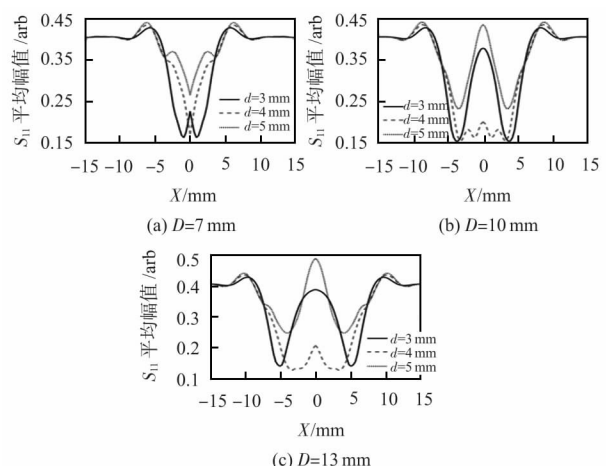


图3 不同尺寸 GFRP 减薄缺陷的  $S_{11}$  平均幅值-探头位置扫查曲线

由图 3 可见,GFRP 缺陷区域与无缺陷区域所对应  $S_{11}$  平均幅值差异大,不同深度缺陷对应  $S_{11}$  平均幅值扫查曲线存在差异,此外,对于不同直径的减薄缺陷,其扫查曲线亦不同。上述分析可知, $S_{11}$  平均幅值对 GFRP 减薄缺陷响应

较为灵敏,其可用于对 GFRP 减薄缺陷的检出及缺陷尺寸参数的量化评估。因此,在实验研究中,选取  $S_{11}$  平均幅值作为检测信号特征用于 GFRP 表面减薄缺陷的检测及成像。

### 2 实验研究

为进一步研究基于微波检测的 GFRP 减薄缺陷可视化定量评估,探究  $S_{11}$  信号及其特征对 GFRP 减薄缺陷的响应规律,在进行仿真研究的同时,搭建 GFRP 减薄缺陷微波定量检测实验系统,并进行相关实验探究,实验系统如图 4 所示。系统主要由控制电脑(PC)、矢量网络分析仪、X-Y-Z 三维扫描台、矩形波导探头和 GFRP 样件组成。实验中,矢量网络分析仪用于激发 Ka 频段入射微波并接收由矩形开口波导测取的反射波,输出各频率下的反射系数,即  $S_{11}$ ;矩形开口波导将主模为  $TE_{10}$  的微波发送至 GFRP 样件同时接收由异质界面反射回的微波;网络分析仪端口及矩形开口波导探头通过柔性同轴电缆连接;电脑则用于控制 X-Y-Z 三维扫描台及网络分析仪的参数设定,实现 GFRP 微波检测二维自动扫描;系统中的吸波材料用于消除外界杂波干扰,提高检测信噪比和测量精度。矩形开口波导探头提高为 5 mm。GFRP 样件尺寸为 300 mm × 300 mm × 6 mm,其内部结构由玻璃纤维层和环氧树脂基体构成,内部纤维铺排形式为单向排列结构。为了模拟 GFRP 表面减薄缺陷,在样件表面加工了一系列不同尺寸的平底圆孔,其直径为 7~13 mm、深度为 3~5 mm。

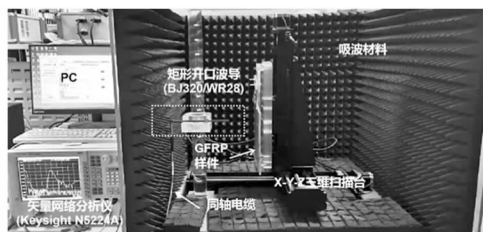


图4 Ka频段GFRP减薄缺陷微波定量检测系统

实验首先探究基于  $S_{11}$  平均幅值的 GFRP 减薄缺陷的微波检测可行性。在 Ka 频段下采用矩形开口波导探头对一个平底圆孔(直径 10 mm、深度 3 mm)进行二维扫描(扫描范围为 40 mm × 40 mm,扫描步长为  $\Delta x = \Delta y = 1$  mm),提取各扫描点处  $S_{11}$  平均幅值,绘制该缺陷的检测图像,如图 5 所示,其中,实线勾勒了该缺陷实际位置及形状大小。

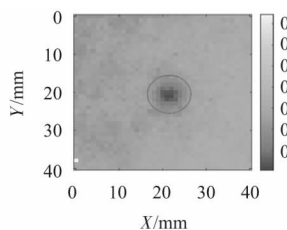


图5 基于  $S_{11}$  平均幅值的 GFRP 减薄缺陷 ( $D = 10$  mm,  $d = 3$  mm) 检测图像

由图 5 可见,GFRP 减薄缺陷可通过基于  $S_{11}$  平均幅值

的微波成像结果实现有效检出,且缺陷大小与实际尺寸基本吻合。为进一步探究利用  $S_{11}$  平均幅值对 GFRP 减薄缺陷尺寸进行定量检测的可行性,对所加工的所有模拟缺陷进行二维扫描,提取各缺陷区域对应的  $S_{11}$  平均幅值,构建不同尺寸 GFRP 减薄缺陷的微波检测图像,结果如图 6 所示,图中三幅子图自上到下依次为直径 7,10,13 mm 的减薄缺陷(不同深度)成像结果,各子图内从左至右依次为深度 3,4,5 mm 的减薄缺陷(相同直径)成像结果,其中实线描绘了各缺陷的实际大小和位置。

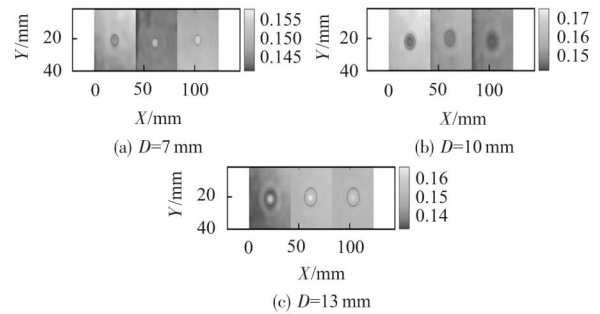


图6 不同尺寸 GFRP 减薄缺陷 Ka 频段微波检测图像

由图 6 可见,在 Ka 频段下,提取  $S_{11}$  平均幅值作为信号特征可有效检出不同尺寸 ( $D = 7 \sim 13$  mm,  $d = 3 \sim 5$  mm) GFRP 减薄缺陷。通过缺陷区域内和无缺陷区域内  $S_{11}$  平均幅值的差异分析可见,成像结果可直接反映出 GFRP 减薄缺陷的直径。然而,由于实验环境中的金属构件(扫描台支撑臂)对微波造成一定的反射,形成干扰杂波,影响了总体缺陷成像结果,因此,图 6 所示结果未能反映出减薄缺陷的深度信息。鉴于此,考虑到成像结果中的干扰杂波多为低频成分,故在进一步的图像处理中,采用高通滤波算法和归一化处理对原始成像结果进行处理,以抑制干扰杂波影响。图 7 所示为当矩形开口波导探头扫描直径 10 mm,深度 3 mm (#1 缺陷)、4 mm (#2 缺陷)和 5 mm (#3 缺陷)三个缺陷中心时所获  $S_{11}$  平均幅值扫描曲线以及处理后的结果。针对归一化处理值得说明的是,在采用高通滤波算法处理后,将所得结果(即,处理后的  $S_{11}$  平均幅值)除以其最大值,获取最终结果(即,归一化  $S_{11}$  平均幅值)。

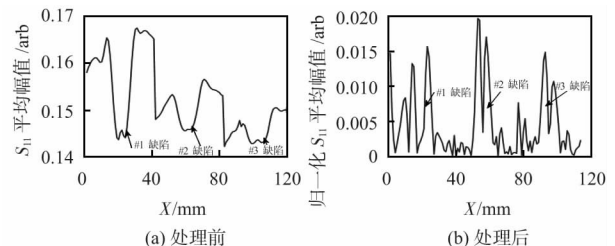


图7 基于高通滤波及归一化算法的  $S_{11}$  平均幅值扫描曲线处理

由图 7 看出,经过高通滤波处理,无缺陷区域内的  $S_{11}$  平均幅值得到一定抑制,提升了其与减薄缺陷区域内的  $S_{11}$  平均幅值的差异,有利于 GFRP 减薄缺陷深度的量化。采用高通滤波算法,各 GFRP 减薄缺陷图像滤波处理后的结

果如图 8 所示。

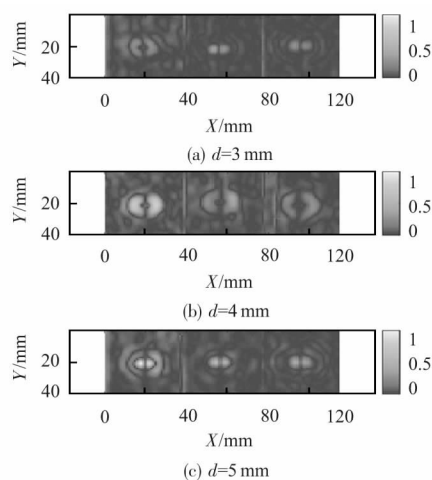


图 8 基于归一化  $S_{11}$  平均幅值的不同尺寸 GFRP 减薄缺陷成像结果

由图 8 可见,经高通滤波处理后,对于同一直径的 GFRP 减薄缺陷其成像结果可直观反映缺陷深度,随缺陷深度增大,归一化  $S_{11}$  平均幅值减小。此外,当缺陷直径增大时,归一化  $S_{11}$  平均幅值增大,进一步说明了处理后的缺陷图像与缺陷尺寸参数存在相关性。因此,结合本文所提图像处理方法,采用 Ka 频段矩形开口波导探头对 GFRP 实施微波检测及成像,可实现对 GFRP 局部减薄缺陷的检出及其尺寸参数的定量评估。

### 3 结论

本文集中探究了 GFRP 表面减薄缺陷的微波定量检测关键。建立了 GFRP 局部减薄缺陷微波检测的二维有限元仿真模型,通过系列仿真,研究了 GFRP 材料减薄缺陷尺寸与  $S_{11}$  平均幅值的关联规律,以此明确了采用  $S_{11}$  平均幅值用于 GFRP 表面减薄缺陷检测及成像的有效性。同时,搭建了 Ka 频段 GFRP 局部减薄缺陷微波检测实验平台,对 GFRP 模拟局部减薄缺陷进行二维扫描检测及成像。通过实验研究,进一步探究了 GFRP 局部减薄缺陷微波定量检测的可行性。研究表明,采用 Ka 频段微波检测,结合所提检测信号特征( $S_{11}$  平均幅值)和图像处理方法(高通滤波算法和归一化处理)可实现对 GFRP 局部减薄缺陷的检测和其尺寸参数的量化评估。

### 参考文献:

- [1] WANG P, LI Z, ZHOU L, et al. Microwave nondestructive detection and quantitative evaluation of kissing defects in GFRP laminates [J]. *Composite Science and Technology*, 2018, 162: 117 - 122.
- [2] 董慧民, 安学锋, 益小苏, 等. 纤维增强聚合物基复合材料低速冲击研究进展 [J]. *材料工程*, 2015, 43(5): 89 - 100.
- [3] NA W S. Possibility of detecting wall thickness loss using a PZT based structural health monitoring method for metal based pipeline facilities [J]. *NDT & E International*, 2017, 88: 42 - 50.
- [4] CASTELLANO A, FRADDOSIO A, PICCIONI M D. Quantitative

analysis of QSI and LVI damage in GFRP unidirectional composite laminates by a new ultrasonic approach [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 151: 106 - 117.

- [5] KUMAR P K, KUPPAN P. Online monitoring of delamination mechanisms in drilling of Mwcnts reinforced GFRP nanocomposites by acoustic emission [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(5): 13036 - 13047.
- [6] 李昕, 康正亮, 胥凯晖, 等. GFRP 不同损伤情况下声发射检测信号特征研究 [J]. *南昌航空大学学报(自然科学版)*, 2016, 30(4): 75 - 81.
- [7] HUMER K, SPIEGBERGER S, WEBER H W, et al. Low-temperature interlaminar shear strength of reactor irradiated glass-fibre-reinforced laminates [J]. *Cryogenics*, 1996, 36(8): 611 - 617.
- [8] PALUMBO D, CAVALLO P, GALIETTI U. An investigation of the stepped thermography technique for defects evaluation in GFRP materials [J]. *NDT & E International*, 2019, 102: 254 - 263.
- [9] 谭建国, 李勇, 李文嘉, 等. 基于毫米波检测的 CFRP 冲击损伤可视化定量评估 [J]. *传感器与微系统*, 2018, 37(10): 12 - 15, 18.
- [10] 张谨. 纤维增强复合材料的太赫兹无损检测研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2016.
- [11] RYU C H, PARK S H, KIM D H, et al. Nondestructive evaluation of hidden multi-delamination in a glass-fiber-reinforced plastic composite using terahertz spectroscopy [J]. *Composite Structures*, 2016, 156: 338 - 347.
- [12] HOSOI A, YAMAGUCHI Y, JU Y, et al. Detection of delamination in GFRP and CFRP by microwaves with focusing mirror sensor [J]. *Material Science Forum*, 2013, 750: 142 - 146.
- [13] HOSOI A, YAMAGUCHI Y, JU Y, et al. Detection and quantitative evaluation of defects in glass fiber reinforced plastic laminates by microwaves [J]. *Composite Structures*, 2015, 128: 134 - 144.
- [14] WANG P, LI Z, ZHOU L, et al. Microwave nondestructive detection and quantitative evaluation of kissing defects in GFRP laminates [J]. *Composite Science and Technology*, 2018, 162: 117 - 122.
- [15] SUTTHAWEEKUL R, TIAN G, WANG Z, et al. Microwave open-ended waveguide for detection and characterisation of FBHs in coated GFRP pipes [J]. *Composite Structures*, 2019, 225: Article 111080.
- [16] 开金星. 基于矩形波导传输/反射法测量 K 和 Ka 波段微波材料电磁参数的研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.
- [17] NIKPARVAR B. Estimation of relative permittivity and thickness for dielectric materials using an open-ended waveguide sensor [D]. Bergen: Bergen University of Bergen, 2016.

### 作者简介:

胡金花(1992-),女,硕士研究生,研究方向为复合材料微波无损定量检测, E-mail: jinhuamy@stu.xjtu.edu.cn.

李勇(1978-),男,通讯作者,博士,副教授,研究领域为结构完整性和装备安全理论与技术, E-mail: yong.li@mail.xjtu.edu.cn.