

# 复合材料雷击损伤超声成像检测\*

## Evaluation of Lightning Strike Damage in Composites Laminate by Using Ultrasonic Imaging Method

中航复合材料有限责任公司 刘松平 刘菲菲 王文贵  
南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 陆铭慧



刘松平

俄罗斯国立莫斯科大学理学博士, 研究员, 博士生导师, 中航工业基础院首席专家, 无损检测学会副理事长, 《无损检测》杂志副主编, 中国复合材料性能测试与检测专业委员会秘书长, 长期从事复合材料及焊接超声可视化成像无损检测技术的研究与应用, 发表论文 90 余篇。

复合材料因其减重和卓越的综合性能和制造工艺优势, 已经在飞机领域得到广泛应用, 特别是在新型飞机设计研发中, 复合材料装机用量已成为飞机先进性的重要标志和提升

针对碳纤维增强树脂基复合材料层压结构, 设计制备了不同的复合材料层压结构试样, 通过雷击模拟, 对复合材料试样进行雷击冲击, 然后, 基于超声反射原理, 利用高分辨率脉冲超声自动扫描成像检测方法, 揭示复合材料受到雷击后在复合材料试样中引起的损伤及行为特征。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.07.026

市场竞争力的技术筹码。例如, 波音 787 飞机复合材料用量达到结构重量的 50%<sup>[1]</sup>。但一旦复合材料内部出现损伤时, 可能会影响其力学性能和结构安全性。因此, 一直以来, 有不少的业内专家和学者在研究损伤对复合材料性能的影响<sup>[1-6]</sup>。在众多的复合材料损伤中, 雷击损伤是业内高度关注的一种损伤形式。一方面, 由于复合材料自身不良的导电性, 容易产生雷击损伤; 另一方面, 飞机在飞行过程中, 经常会遇到雷雨天气, 不可避免地会受到雷电袭击, 从而造成雷击损伤, 严重时会影响到飞机的飞行安全。因此, 复合材料雷击损伤的无损检测受到业内高度关注, 先后有不少学者开展了复合材料雷击损伤的无损检测技术研究<sup>[1,7]</sup>。

本文针对碳纤维增强树脂基复

合材料层压结构, 设计制备了不同的复合材料层压结构试样, 通过雷击模拟, 对复合材料试样进行雷击冲击, 然后, 基于超声反射原理, 利用高分辨率脉冲超声自动扫描成像检测方法, 揭示复合材料受到雷击后在复合材料试样中引起的损伤及行为特征。

### 试样制备与试验方法

#### 1 试样制备

针对目前飞机上已经普遍采用的碳纤维增强树脂基复合材料, 设计制备了典型的复合材料层压结构试样, 试样增强体为 T700 纤维, 基体为 BA9916 环氧树脂, 试样大小约 150mm × 100mm, 厚度约 3mm, 试样为多向铺层结构, 采用热压罐成型工艺制造而成, 试样表面未加任何雷击防护涂层。对设计制备好的复合材

\* 国家自然科学基金(60727001、60572099)和无损检测技术教育部重点实验室基金项目(200929009)资助。

料试样进行闪电冲击试验,如图1所示,利用闪电冲击模拟雷击,将闪电设备的放电端子置于复合材料试样的中心位置上方,进行雷击放电模拟。闪电电压  $U$  和电流  $I$  通过闪电设备设置,其雷击模拟原理是,通过闪电设备中的高压单元对电容进行充电,形成放电高压,然后,控制高压电容快速放电,通过放电端子在试样上方产生一个瞬时高压放电脉冲,对试样进行闪电冲击,形成雷击作用,雷击电压约为 50kV,放电电流约为 27kA。

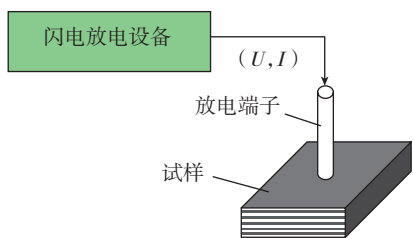


图1 雷击试验方法

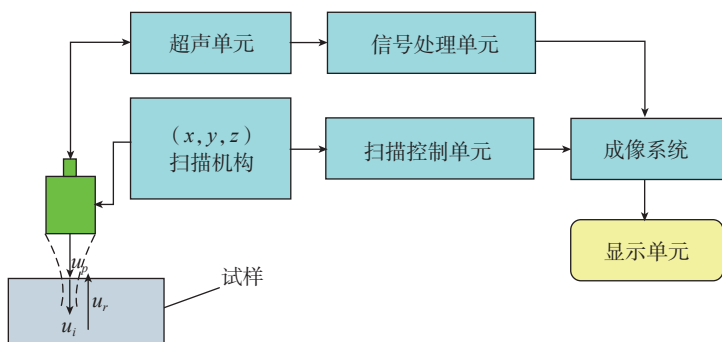


图2 超声成像检测方法

## 2 超声成像检测方法

超声成像检测是基于声波的传播行为,入射声波在复合材料内部传播,当在其传播路径上出现损伤或者缺陷时,则入射声波原来的传播行为会发生某些改变,这种变化与损伤区的声学特性和几何特征等有关,如在损伤周围,入射声波将会产生反射。理论上,入射声波在损伤区的反射可以近似表示为:

$$u_r = Ru_i \quad (1)$$

式中,  $u_r$  为入射声波在复合材料 / 损伤界面形成的反射声波,  $R$  为入射声波在复合材料 / 损伤界面的声压反

射系数,与复合材料和损伤的密度和声速有关,  $u_i$  为复合材料 / 损伤界面的入射声波。

通过专门的超声检测设备,对被检测复合材料进行扫描,提取每个检测位置点的  $u_r$ ,即可实现检测结果的超声成像。基于此原理,对经过雷击试验后的复合材料试样进行超声反射法检测试验分析,超声检测试验系统采用中航复合材料有限责任公司(ACC)生产的 CUS-21J,如图2所示,主要由超声换能器、超声单元、信号处理单元、 $(x, y, z)$  扫描机构、扫描控制单元、成像系统和显示单元等几部分构成。通过超声单元产生高质量超声波激励信号,激发换能器产生具有单周特性的超声脉冲入射声波  $u_p$ ,换能器采用 ACC 生产的 FJ-1 高分辨率超声换能器,通过耦合介质入射到被检测复合材料试

样中,在试样中形成入射声波  $u_i$ ,然后,利用换能器接收来自试样中的超声反射回波  $u_r$ ,经过超声单元进行前置处理后,由信号处理单元将  $u_r$  转换为数字信号。同时换能器在扫描控制单元作用下,通过  $(x, y, z)$  扫描机构驱动换能器对试样进行扫描,并通过控制系统实时将对应每个检测点位置信息传送到成像系统,将来自换能器的超声检测信息和位置信息进行重构,形成成像信号,从而将对应的检测结果在显示单元实时显示。通过选择超声扫描模式,实现对雷击试样超声 C-扫描和 B-扫描成像,

从而揭示雷击在试样中形成的冲击损伤及其行为规律。由于所采用的超声检测系统的近表面盲区和纵向分辨率可达到单个复合材料厚度,约 0.13mm。因此,即使雷击在试样表面和近表面产生的损伤也将能够非常清晰地再现出来。

## 检测结果与分析

### 1 缺陷表征方法

为了分析闪电在复合材料试样中引起的雷击损伤面积和分布特征,采用图3所示的缺陷表征方法:(1)用  $L_x^s$  表示闪电在复合材料试样表面引起的雷击损伤在  $x$  方向的取向长度(即  $x$  方向投影长度),  $x$  方向亦为复合材料试样的长度方向,用  $L_x^i$  表示闪电在复合材料试样内部引起的雷击损伤在  $x$  方向的取向长度(即  $x$  方向投影长度),  $x$  方向亦为复合材料试样的长度方向;(2)用  $L_y^s$  表示闪电在复合材料试样表面引起的雷击损伤在  $y$  方向的取向长度(即  $y$  方向投影长度),用  $L_y^i$  表示闪电在复合材料试样内部引起的雷击损伤在  $y$  方向的取向长度,  $y$  方向亦为复合材料试样的宽度方向。在同样的条件下,  $L_x^s$  或  $L_x^i$  越大,表示闪电在复合材料试样表面或者内部引起的雷击损伤在  $x$  方向取向越明显,沿  $x$  方向扩展越大;  $L_y^s$  或  $L_y^i$  越大,表示闪电在复合材料试样表面或者内部引起的雷击损伤在  $y$  方向取向越明显,沿  $y$  方向扩展越明显。

### 2 结果与分析

图4是经过雷击后,在复合材料试样表面形成的目视损伤检测结果,

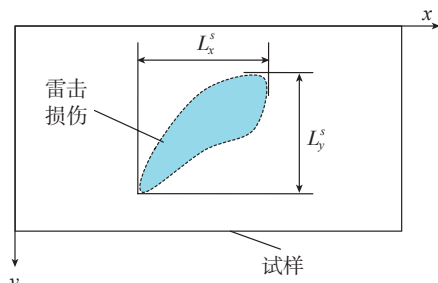


图3 损伤表征方法

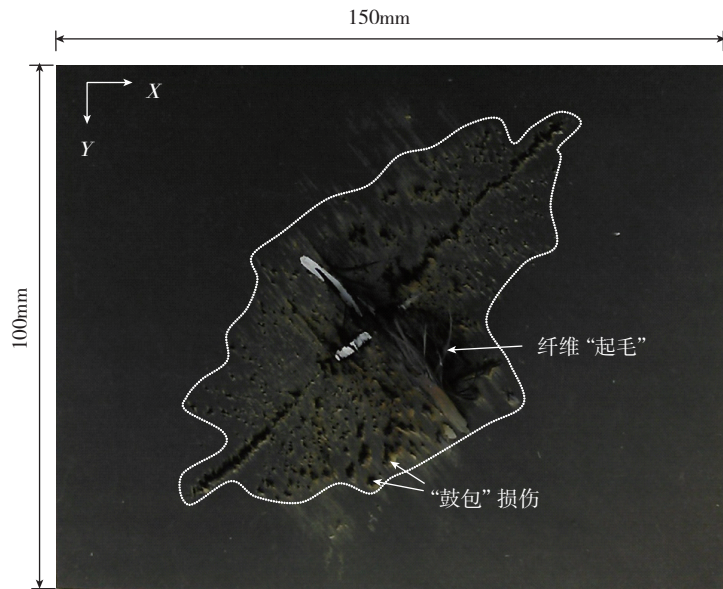


图4 雷击损伤目视检测结果

从图4中可以清晰地看出:(1)在试样中心位置,损伤最严重,且试样表面纤维出现了非常明显的“起毛”和烧伤情况,如图中白色箭头标示的损伤,这主要是由于在试样中心位置,是放电端子作用位置,也是雷击脉冲主瓣作用区域,因而放电电流最大,造成的损失最明显;(2)雷击损伤在试样45°方向有一个明显的取向分布特征,这可能与试样中铺层纤维的取向有关;(3)在试样表面雷击损伤区还可以清晰地看出许多呈现随机分布的“鼓包”损伤,其大小不一,如图中白色箭头所标示的区域,这主要是由于雷击过程,不同能量放电脉冲

“火花”与试样表面相互作用产生的雷击损伤;(4)雷击在试样表面形成的损伤具有明显的面积分布特点和取向特征,其中,雷击损伤在X方向的最大投影长度 $L_x^s \approx 83\text{mm}$ 、在Y方向的最大投影长度 $L_y^s \approx 112\text{mm}$ 。不过,从图4中的目视检测结果难以得到雷击在试样内部产生的损伤情况,这可以通过超声检测方法来揭示雷击在试样内部产生的损伤情况。

图5是试样中雷击损伤的超声C-扫描成像结果,从图中可以清晰地看出:(1)雷击在试样内部产生的损伤面积和区域,如图中白色虚线所标示的区域;(2)图5中显示的内部

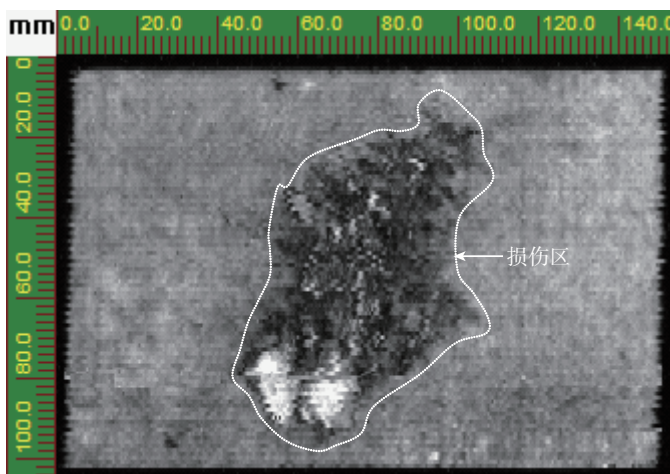


图5 雷击损伤超声C-扫描检测结果

雷击损伤与图4中显示的表面目视雷击损伤所反映出的分布取向特征相一致;(3)图5中显示的内部雷击损伤几乎连成片,而在图4中则呈现了许多分散分布的小“鼓包”损伤,这是因为C-扫描反映的是试样内部雷击损伤在厚度方向的投影叠加后的结果;(4)内部雷击损伤与表面雷击损伤存在一定的拓展联系,比较图4和图5中显示的雷击损伤区域分布形状,不难看出二者存在相一致的面积扩展趋势联系,如图4和图5中虚线所标示的损伤区域所示,这主要是由于雷击脉冲能量从试样表面沿厚度方向向其内部扩展所致;(5)从图5中可以十分清晰地看出在非雷击作用区,其成像灰度分布非常均匀,表明试样内部这些区域没有出现雷击损伤;(6)从图中超声C-扫描结果可以得出雷击损伤在X方向的最大投影长度 $L_x^i \approx 172\text{mm}$ 、在Y方向的最大投影长度 $L_y^i \approx 124\text{mm}$ ,显然,比图4中显示的雷击损伤在X方向的最大投影长度约大41mm、在Y方向的最大投影长度约大60mm,即, $L_x^i/L_x^s \approx L_y^i/L_y^s \approx 1.5$ ,由此可见,雷击在复合材料内部引起的损伤要比表面损伤大的多。为了揭示雷击损伤在试样厚度方向的分布与拓展情况,对雷击试样进一步开展了超声B-扫描成像检测分析。

图6是对复合材料试样进行超声B-扫描成像检测的结果,对应试样中心位置附近的其中一个断面位置,声波从试样雷击作用区的对侧入射,图中F和B分别对应试样的表面和底面(雷击作用区一侧)。从图6中可以非常清晰地看出:(1)试样断面轮廓,表明入射声波完全穿透了试样,并在试样底面和表面形成了清晰的声波反射,也表明入射声波能够有效传播到雷击损伤区;(2)从图6中灰度分布,可以清晰地看出试样内部铺层分布特征,即层压铺层拓

展分布情况,如图6中沿水平方向呈现“波浪”状分布的白色灰度条带所示,这主要得益于采用高分辨率超声检测技术,采用图2所示的超声扫描成像试验系统,回波脉冲特性可以达到单个周期,此时,其检测分辨率和表面检测盲区可以稳定地达到单个复合材料铺层的厚度,约 $0.13\text{mm}^{[8]}$ ;

(3)从图6中可以非常清晰地看出,雷击损伤明显位于试样近表面,这表明闪电电压在 $50\text{kV}$ 、电流在 $27\text{kA}$ 左右时,雷击在复合材料试样中产生的损伤主要位于复合材料层压结构表面和近表面,从图6中不难得出雷击损伤在试样厚度方向主要分布在约 $0\sim 0.5\text{mm}$ 的深度范围,即此时,雷击主要是造成试样近表面几个纤维铺层的破坏;

(4)从图6中还可以非常清晰地看出雷击损伤沿试样厚度方向分布特征,即雷击损伤区由若干个不同位置和深度的小损伤构成,如图白色箭头所标示的白色灰度区,这与图4中目视检测结果相一致;

(5)从图6中超声B-扫描结果,还可以看出,雷击损伤由试样表面向内部的增进和拓展特征,这主要是因为,在进行超声B-扫描成像检测时,所采用的超声系统能够有效提取到来自位于不同深度铺层的损伤的声波信息,因而,在图6中可以清晰地看出损伤

的构成特征和沿试样深度方向的拓展细节。因此,从图6中的超声B-扫描结果,可以十分清晰地揭示出雷击损伤在试样断面深度位置和沿试样厚度方向的分布特征,与超声C-扫描结果相结合,即可得到雷击损伤在试样中的3D分布。

## 结论

(1)在雷击电压为 $50\text{kV}$ 、电流为 $27\text{kA}$ 时,雷击在T700/BA9916碳纤维复合材料层压结构中会产生明显的目视表面损伤和内部损伤,损伤深度分布主要位于 $0\sim 0.5\text{mm}$ 范围内。

(2)采用高分辨率脉冲超声反射法,通过超声C-扫描成像方法,可以非常有效和清晰地揭示雷击在复合材料层压结构中产生的损伤区域、面积、沿铺层方向的取向等损伤行为特征。在超声C-扫描成像中损伤分布特征与试样表面目视观察到得的损伤存在一致的关联特征,不过,利用超声C-扫描成像检测方法,能够更加有效地检出复合材料内部的雷击损伤及其确切的分布特征、大小等。

(3)超声C扫描成像结果表明,雷击在复合材料内部引起的损伤要比在表面引起的损伤大的多。

(4)借助高分辨率超声B-扫描

成像方法,可以十分有效地揭示出雷击损伤在复合材料试样断面中的分布、深度及其在厚度方向的拓展特征,与超声C-扫描相结合,可以非常有效的得到雷击损伤在复合材料层压结构中的3D分布特征,而且利用所采用的高分辨率超声B-扫描成像技术,还可以得到复合材料层压结构厚度方向的铺层拓展特征。

因此,所研究的高分辨率超声反射法及其成像检测技术和检测系统为复合材料雷击损伤的无损检测与损伤行为的研究提供了一种非常有效的检测手段。目前,该项检测技术及其超声检测系统已经得到了大量的实际检测应用,取得了非常好的检测效果。

## 参考文献

- [1] HEIDA J H, PLATENKAMP D J. In-service inspection guidelines for composite aerospace structures. 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa, 2012:16-20.
- [2] Ishikawa T, Sugimoto S, Matsushima M, et al. Some experimental findings in CAI tests of CF/PEEK and conventional CF/EPOXY flat plates. *Composite Science and Technology*, 1995, 55: 349-362.
- [3] Hitchen S A, Kemp R M J. The effect of stacking sequence on impact damage in a carbon fibre/epoxy composite. *Composites*, 1995, 26(3): 207-214.
- [4] 焦亚男,李嘉禄,魏丽梅,等. 损伤形式对三维编织复合材料拉压性能的影响. *复合材料学报*, 2006, 23 (6): 52-56.
- [5] 林智育,许希武. 复合材料层板低速冲击后剩余压缩强度. *复合材料学报*, 2008, 25 (1): 140-146.
- [6] Akay M, Spratt G R, Meenan B. The effects of long-term exposure to high temperature on the ILSS and impact performance of carbon fibre reinforced bismaleimide. *Composites Science and Technology*, 2003(63):1053-1059.
- [7] Shin J H, Kwon O Y. AE monitoring of lightning-damaged CFRP laminates during compression-after-impact test. *Acoustic Emission*, 2011(29):98-105.
- [8] 刘松平,傅天航,刘菲菲,等. 复合材料冲击损伤超声回波特性及其成像检测. *航空制造技术*, 2011(15): 82-85. (责编 玲犀)

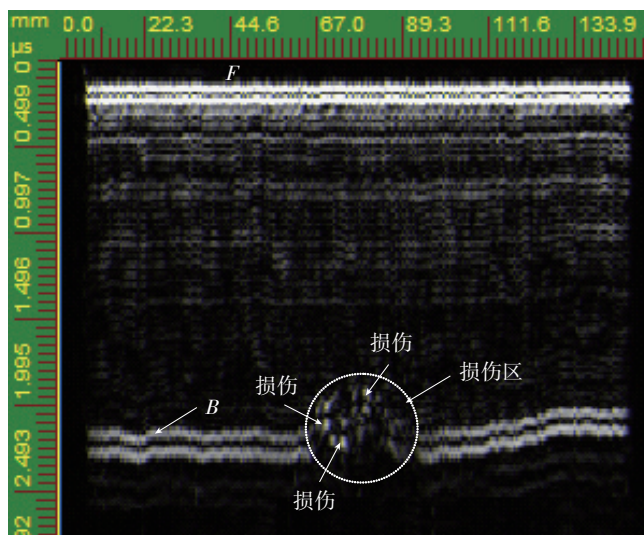


图6 雷击损伤超声B-扫描检测结果