

# 基于多频率超声综合比对法的 三维编织复合材料检测

曲亚林<sup>1,2</sup>, 宁 宁<sup>1</sup>, 詹绍正<sup>1</sup>

(1. 中国飞机强度研究所, 西安 710065; 2. 机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049)

**摘 要:** 介绍了三维编织复合材料的工艺成型特点以及容易产生的缺陷类型。采用多种频率的超声波对三维编织材料内部的缺陷进行检测, 并对检测结果进行综合比对分析。试验结果表明, 多频率超声综合比对法虽然无法对材料内部的孔隙分布进行定量检测, 但可以对不同区域孔隙分布情况进行判断。

**关键词:** 三维编织复合材料; 超声; 无损检测

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2023)06-0071-04

## 3D braided composites testing based on multi-frequency ultrasonic comprehensive comparison method

QU Yalin<sup>1,2</sup>, NING Ning<sup>1</sup>, ZHAN Shaozheng<sup>1</sup>

(1. China Aircraft Intensity Research Institute, Xi'an 710065, China;

2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The process characteristics of 3D braided composites materials and the types of defects that are prone to occur were introduced. Variety of frequencies of ultrasonic waves were used to detect defects inside the material, and the test results were comprehensively compared and analyzed. The test results showed that although the multi-frequency ultrasonic comprehensive comparison method cannot quantitatively detect the pore distribution inside the material, it can judge the pore distribution in different regions.

**Key words:** 3D braided composite; ultrasonic; nondestructive testing

三维编织复合材料是采用编织技术织造的纤维编织物作为增强体, 经 RTM(树脂传递模塑法)将树脂注入预成型件, 最终固化成型的新材料。和传统的复合材料层合板结构不同, 三维编织复合材料的空间互锁网状结构从根本上避免了分层损伤的产生, 且抗冲击能力明显增强。三维编织复合材料在保持了构件承载变形的整体性的同时, 还具有比强度高、比模量大、易于一次成型复杂结构等优点, 在航空、航天、船舶领域的应用愈发广泛<sup>[1]</sup>。

采用多种频率的超声波对三维编织复合材料内部缺陷进行检测, 并对检测结果进行综合比对分析, 旨在

分析多频率超声综合比对法对材料内部缺陷定性定量检测的可行性。结果表明, 多频超声虽无法对内部孔隙进行定量检测, 但可以对其分布情况进行判断。

## 1 三维编织复合材料的制造工艺

### 1.1 三维编织工艺

常见的三维编织方法分为四步编织法、二步编织法和多层连锁编织法<sup>[2]</sup>。其中, 四步编织法应用最为广泛。因为四步编织法结构中所有纱线在空间中的分布有 4 个不同的方向, 所以制成的复合材料被称为三维四向编织复合材料<sup>[3]</sup>。

二步编织法的特点是编织过程中编织纱的运动以两步为一个编织循环。在编织过程中, 编织纱在携纱器的携带下, 将沿轴向排列的轴纱捆绑到一起, 构成一个空间整体。二步编织法的特点是可以织出

收稿日期: 2022-11-09

作者简介: 曲亚林(1986—), 女, 本科, 工程师, 主要从事飞机结构损伤检测与结构维修方向的研究工作

通信作者: 宁 宁, df.ning@163.com

非常厚的结构<sup>[4]</sup>。

多层连锁编织方法中, 编织纱和轴纱分开, 用专用的编织纱将邻近薄层相互连接起来, 来提高其整体性能<sup>[4]</sup>。

### 1.2 三维编织成型工艺

三维编织复合材料的成型方法主要是树脂传递

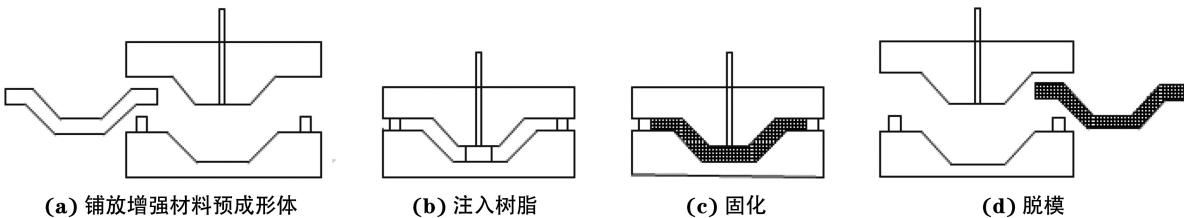


图1 RTM工艺基本原理

## 2 三维编织复合材料制造中产生的缺陷类型

三维编织复合材料的内部缺陷主要在成型工艺过程中产生<sup>[7]</sup>。成型中, 靠在真空或附加压力作用, 将树脂注入纤维编织的预制形体内, 因驱动力的差异, 树脂在预制形体内会产生纤维束间和纤维束内两种流动路径。纤维束间空间相对开阔, 树脂流动速度主要取决于黏性力, 影响因素包括树脂注射压力和黏度; 纤维束内空间相对狭小, 树脂流动速度主要取决于毛细管力, 影响因素包括树脂表面张力和润湿接触角。将树脂流动过程中黏性力和毛细管力的比值定义为修正毛细管数, 修正毛细管数决定了束间和束内流动前沿的相对位置。当修正毛细管数较低时, 束内流动起主导作用, 易形成束间孔隙[见图 2(a)], 也就是树脂区孔隙类缺陷; 当修正毛细管数较高时, 束间流动起主导作用, 易形成束内干斑[见图 2(b)], 也就是纤维束未被树脂完全浸润的缺陷。可见, 缺陷的产生和类型与 RTM 工艺、纤维束构型等关系紧密。材料在不规则树脂流动和纤维束阻塞效应的影响下, 闭合模具内空气或挥发气体留在了产品内部, 产生的树脂区孔隙、纤维束未完全浸润等缺陷, 呈现出几何复杂、分布随机等特征<sup>[8]</sup>。

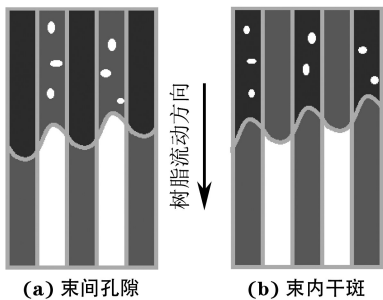


图2 束间孔隙和束内干斑形成过程示意

模塑法, 也称为 RTM 工艺方法<sup>[5]</sup>。RTM 成型工艺过程如下: ① 首先在模腔内预先铺放增强材料制成的预成形体; ② 然后在压力或真空作用下将树脂注入闭合模腔浸润预成形体的纤维; ③ 再等待固化后脱模, 脱模后对其再进行二次加工便可得到最终产品。

## 3 三维编织复合材料的超声检测

超声检测作为树脂基复合材料最常用的无损检测方法, 对分层、脱黏、孔隙等类型缺陷的检测效果好, 缺陷特征信号明显。相比层合板, 三维编织复合材料不存在分层、脱黏缺陷, 而无论是束间孔隙还是束内干斑, 都可以看作是结构件内部的树脂未浸润区域, 因为未浸润区域和完全浸润区域的声阻抗存在差异, 在两种区域的临界面存在超声波的反射与透射, 所以可以利用超声法对未浸润区域进行检测。笔者选择复合材料检测中常用的 5 MHz 纵波线阵列探头, 采用脉冲反射法垂直入射方式对三维编织复合材料进行检测, 其 C 扫描结果示例如图 3 所示, 可以看出, 树脂未浸润区域呈不同深度、不同几何形状, 分布无规则。综合考虑, 笔者在试验中选择多种频率超声波对三维编织复合材料内部缺陷进行检测。

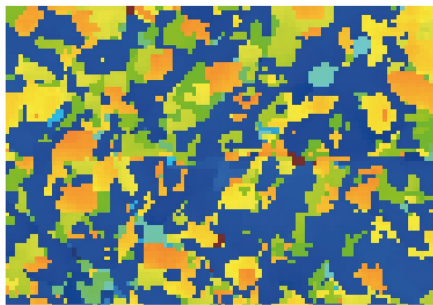


图3 三维编织复合材料的 C 扫描结果示例

### 3.1 试样的选取

从某转子上截取一段三维编织复合材料叶片作为试样, 其为变厚度、变曲率结构件, 厚度为 4~12 mm, 叶片试样外形尺寸如图 4 所示。

### 3.2 探头的选取

考虑试样的材料与厚度, 选择复合材料检测常

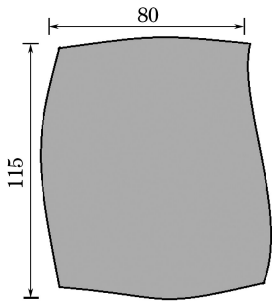


图 4 叶片试样外形尺寸

用的 3 种不同频率的纵波直探头进行检测,探头相关参数如表 1 所示。

表 1 纵波直探头相关参数

探头型号	探头频率/MHz	探头直径/mm
OLYMPUS V201	5.00	6
OLYMPUS C125	2.25	10
OLYMPUS V103	1.00	12

3.3 多频率超声检测结果

(1) 5 MHz 探头扫查结果

选取 5 MHz 纵波直探头,采用脉冲反射法垂直入射方式对试样进行全覆盖扫查,得到的典型波形如图 5 所示。扫查中可见内部质量良好区的底面反射回波清晰,波幅较高;孔隙聚集区存在底波衰减现象,不同厚度处出现了孔隙回波。对试样全覆盖扫查后,对超声异常区域用白色记号笔进行标识,异常区域标识如图 6 所示,其中白点状阴影部分为孔隙聚集区,此部分区域编号为 A 区。

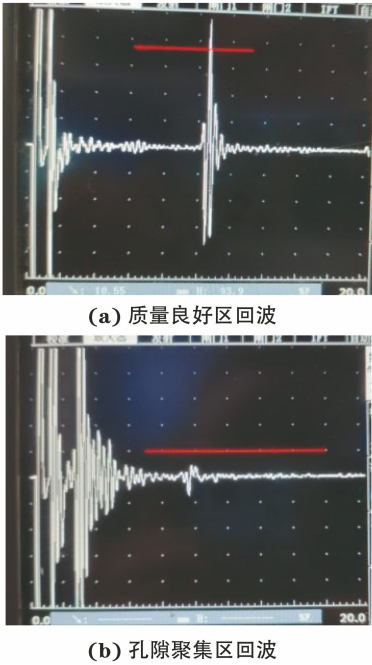


图 5 5 MHz 频率下三维编织复合材料超声信号典型波形



图 6 5 MHz 频率下试样异常区域标识示意

(2) 2.25 MHz 探头扫查结果

选取 2.25 MHz 纵波直探头,采用脉冲反射法垂直入射对试样进行全覆盖扫查,不同区域的典型波形如图 7 所示,可见,相比于 5 MHz 探头,2.25 MHz 频率扫查下的回波脉冲宽度变宽。对试样全覆盖扫查后,对超声回波异常区域用记号笔标识,异常区域标识如图 8 所示,其中斜划线阴影部分为孔隙聚集区,此部分区域编号为 B 区。从图 8 中可以看出 B 区全部位于 A 区内部,面积小于 A 区。

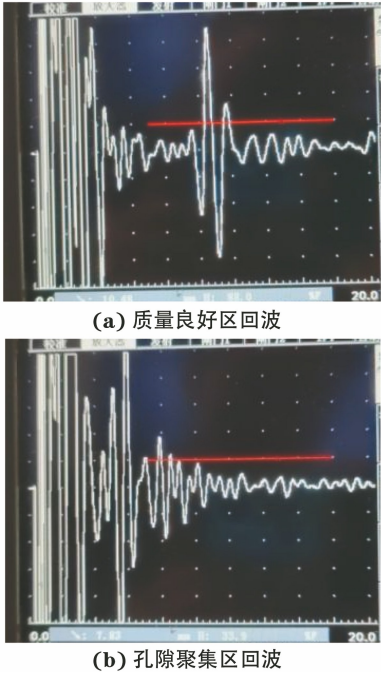


图 7 2.25 MHz 频率下三维编织复合材料超声信号典型波形

(3) 1 MHz 探头扫查结果

选取 1 MHz 纵波直探头,采用脉冲反射法垂直方式入射对试样进行全覆盖扫查,不同区域的典型波形如图 9 所示。可见,相比于 5,2.25 MHz 探头,1 MHz 频率扫查下的回波脉冲宽度更宽。对试样





图 8 2.25 MHz 频率下试样异常区域标识示意

全覆盖扫查后,对超声回波异常区域用记号笔标识,异常区域标识如图 10 所示,其中网格线阴影部分为孔隙聚集区,此部分区域编号为C区。从图中可以

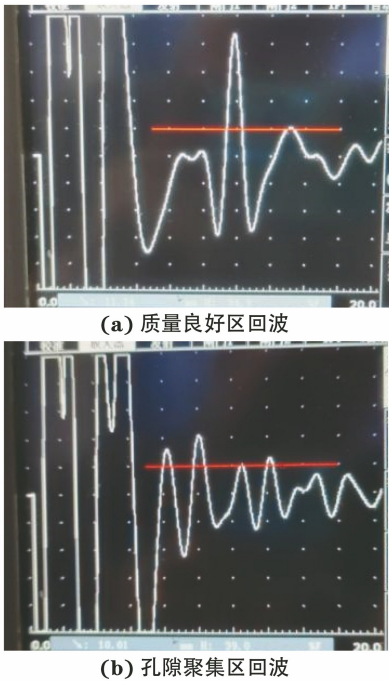


图 9 1 MHz 频率下三维编织复合材料超声信号典型波形



图 10 1 MHz 频率下试样异常区域标识示意

看出 C 区全部位于 B 区内部,面积小于 B 区。

### 3.4 检测结果分析

相对来说,超声波频率高时,对小缺陷有明显响应,可以对材料的内部孔隙做精细检查;检测频率低时,能量衰减小,声波相对容易绕过小缺陷而穿透整个试样。对于该试样,同一区域在不同检测频率下的检测结果可能存在明显差异,高频率超声波入射到缺陷界面时大部分能量被反射,无法到达试样底部;低频率超声波更容易透过缺陷,得到试样底面反射回波。综合三种频率下的检测结果,可以得出结论:孔隙分布的严重程度 C 区>B 区>A 区。

## 4 结语

三维编织复合材料内部的主要缺陷类型为树脂未浸润,即材料内部的孔隙缺陷,笔者采用超声纵波垂直入射法时复合材料内部缺陷进行检测,并综合对比多种不同频率超声波的检测结果。试验结果表明,超声法虽然无法对材料内部的孔隙分布进行定量检测,但可以对不同区域孔隙分布情况进行判断。

### 参考文献:

- [1] 张迪,郑锡涛,孙颖,等. 三维编织与层合复合材料力学性能对比试验[J]. 航空材料学报,2015,35(3):89-96.
- [2] 王一博,刘振国,胡龙,等. 三维编织复合材料研究现状及在航空航天中应用[J]. 航空制造技术,2017,60(19):78-85.
- [3] 万振凯,李鹏,贾敏瑞,等. 大尺寸三维编织复合材料结构损伤指数特征[J]. 纺织学报,2018,39(9):65-70.
- [4] 李苏红,刘丽芳,阎建华,等. 三维编织结构参数对复合材料拉伸性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料,2014(7):69-73.
- [5] 梅启林,冀运东,陈小成,等. 复合材料液体模塑成型工艺与装备进展[J]. 玻璃钢/复合材料,2014(9):52-62.
- [6] 郑锡涛,屈天骄. 三维编织复合材料制造技术及力学性能研究进展[J]. 航空制造技术,2011,54(20):40-44.
- [7] 何先成,刘刚,包建文. 预浸料在 RTM 工艺中的应用研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2015(4):71-75,34.
- [8] 徐焜,钱小妹. 随机孔隙缺陷对 3D 编织复合材料力学性能的影响研究[J]. 固体力学学报,2013,34(4):396-400.