

# 碳纤维复合材料层压板人工缺陷的水浸超声检测

李 锋, 吕洪涛, 刘志毅, 王俊涛, 张方洲

(中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

**摘要:** 采用贴膜法、插拔钢片法、脱模剂法和脱模膏法的方式制作不同尺寸及埋深的人工缺陷试块, 并对其进行水浸超声检测。结果表明, 水浸超声检测方法可以有效检测出复合材料层压板中由贴膜法、插拔钢片法制作的人工缺陷, 但对于脱模剂法和脱模膏法制作的人工缺陷检测效果较差。该研究对碳纤维复合材料层压板人工模拟缺陷试块的制作及其超声检测具有一定的参考意义。

**关键词:** 复合材料; 人工缺陷; 水浸超声

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2022)01-0006-04

## Water immersion ultrasonic testing of artificial defects in carbon fiber composite laminates

LI Feng, LÜ Hongtao, LIU Zhiyi, WANG Juntao, ZHANG Fangzhou

(China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China)

**Abstract:** In this paper, the specimens with artificial defects of different sizes and buried depths were made by using sticking membrane method, inserting steel sheet method, mold release agent method and demoulding cream method respectively, and then the water immersion ultrasonic testing was carried out on them. The results show that the water immersion ultrasonic detection method can detect the artificial defects in composite laminates made by sticking membrane method and inserting steel sheet method effectively, but is insufficient to detect the artificial defects made by mold release agent method and demoulding cream method. The research work in this paper has a certain reference significance for the fabrication of specimens with artificial defect and ultrasonic inspection of carbon fiber composite laminates.

**Key words:** composite; artificial defect; water immersion ultrasonic

碳纤维复合材料层压板具有较好的比强度和比刚度, 同时还具有耐腐蚀、抗疲劳、耐高温等优点, 已广泛应用于航空航天领域<sup>[1]</sup>。复合材料的成形过程很复杂, 在制造工艺以及运输、操作过程中都可能产生缺陷<sup>[2]</sup>。疲劳累计、撞击、腐蚀等因素产生的缺陷容易危及产品的寿命及使用安全<sup>[1-3]</sup>。因此, 对复合材料进行无损检测及评价是至关重要的环节。水浸超声 C 扫描检测因具有灵敏度高、自动成像、检测速度快、检测效率高等优点, 被广泛应用于碳纤维复合材料层压板缺陷的无损检测和量化评估中。根据

已有超声检测标准, 在超声检测过程中, 特别是在灵敏度调整和缺陷量化评估中, 对比试块具有极其重要的作用。随着复合材料加工制造工艺水平的提高, 已逐步形成了多种复合材料层压板结构对比试块加工方法, 如贴膜法、插拔钢片法、脱模剂法和脱模膏法等, 然而, 对不同人工缺陷对比试块加工方法及其超声检测有效性的对比分析较少。为此, 笔者采用不同复合材料层压板人工缺陷加工工艺, 制作了一批不同尺寸与埋深的人工缺陷对比试块, 并对试块进行水浸超声 C 扫描检测试验。

## 1 水浸超声 C 扫描检测方法及系统

超声检测主要是基于超声波在工件中的传播特性, 如超声波在通过材料时能量会损失, 在声阻抗不

收稿日期: 2021-06-21

作者简介: 李 锋(1988—), 男, 工程师, 主要从事无损检测工作

通信作者: 李 锋, 258126466@qq.com

同的两种介质分界面处会发生反射、折射和散射等,对工件中存在的缺陷进行检测。

根据探头与工件间的声耦合方式,超声检测方法可以分为接触法和液浸法等。接触法是通过一层很薄的耦合剂将探头与工件表面直接接触进行检测的技术。作为最基本的超声检测方法,接触法操作简便,能够满足绝大多数产品的要求。液浸法是将探头和工件全部或部分浸入液体中,超声波通过液体进入工件中的一种非接触式超声检测方法。液浸法最常用的耦合剂为水,又称水浸法。相比于接触法,液浸法具有更好的耦合稳定性和检测结果重复性,能实现自动检测,降低人为干扰因素。水浸超声检测系统外观如图1所示。该系统由6轴扫描平台、探头、超声激励接收设备、水槽以及工控机等组成,可实现水浸超声A,B,C扫描检测。



图1 水浸超声检测系统外观

## 2 对比试块的制作

层压板的设计参照国家军用标准GJB 8598—2015《飞机复合材料结构设计通用要求》中的复合材料一般设计要求和层压板结构设计要求,层压板

的制作工艺符合GJB 2895—1997《碳纤维复合材料层合板和层合件通用规范》中对材料、理化性能、尺寸公差、翘曲、外观质量等的要求,人工缺陷的制作方法参照了我国航空标准HB 7825—2007《复合材料制件无损检测对比试块制作与要求》中人工缺陷制作的相关要求和HB 5461—1990《金属结构胶接结构缺陷类型及试块》的要求。笔者采用以下4种方法制作人工缺陷。

(1) 贴膜法:在织物层中放置厚度约为0.4 mm的聚四氟乙烯膜。

(2) 插拔钢片法:在织物层边缘放置不锈钢刀片,成型后拔出,使边缘形成类似分层的空气隙。为了在碳纤维层压板成型后方便拔出钢片,将钢片制作成梯形,钢片厚度为0.1 mm,材料为不锈钢,牌号为0Cr18Ni9。由于只能在碳纤维层压板边缘制作插拔钢片模拟缺陷,故在考虑制作成本等因素的情况下,模拟缺陷试块与贴膜法试块同时制作,即在同一块碳纤维层压板上制作两种缺陷,层压板边缘使用插拔钢片法制作人工缺陷,层压板中间区域使用贴膜法制作人工缺陷。

(3) 脱模剂法:共制作两种试块,第一种为在特定织物层上涂抹脱模剂,第二种为去除两层织物之间的胶层,在缺陷上涂抹脱模剂。脱模剂牌号同为Loctite Frekote 55NC。

(4) 脱模膏法:在特定织物层上涂抹油脂状脱模膏。

试块中有 $\phi 4, \phi 7, \phi 8, \phi 10, \phi 12, \phi 15, \phi 17$  mm等不同尺寸的人工缺陷。缺陷深度包括1,1.5,2,3,4 mm。对比试块设计参数如表1所示,各对比试块尺寸如图2所示。

表1 对比试块设计参数

试块编号	缺陷制作方法	缺陷直径	缺陷埋深	板厚	备注
贴膜法-1 <sup>#</sup>	插拔钢片法	10,12,15,17	1.5,2	5	—
	贴膜法	10,12,15,17	1,1.5,2	5	
贴膜法-2 <sup>#</sup>	贴膜法	4,7,10,15	1,2,3	6	—
脱模剂法-1 <sup>#</sup>	脱模剂法	10,12,15,17	1,1.5,2	5	在特定织物层上涂抹脱模剂
脱模剂法-2 <sup>#</sup>	脱模剂法	8,10,12,15	2,3,4	8	在特定织物层上涂抹脱模剂
脱模剂法-3 <sup>#</sup>	脱模剂法	4,7,10,15	2,3,4	8	去除两层织物之间的胶层,在缺陷上涂抹脱模剂
脱模膏法-1 <sup>#</sup>	脱模膏法	10,15	1	3	—

## 3 检测结果及分析

采用型号为MZ-03的超声C扫描系统对试块进行水浸超声检测。为获得较好的检测效果,选用

聚焦探头,频率为15 MHz,焦距为152.4 mm。主要检测参数有:声速为 $2719 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,脉冲重复频率为1 200 Hz,扫查速度为 $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,扫查步进为1 mm。各试块的C扫描检测结果如图3~8所示。

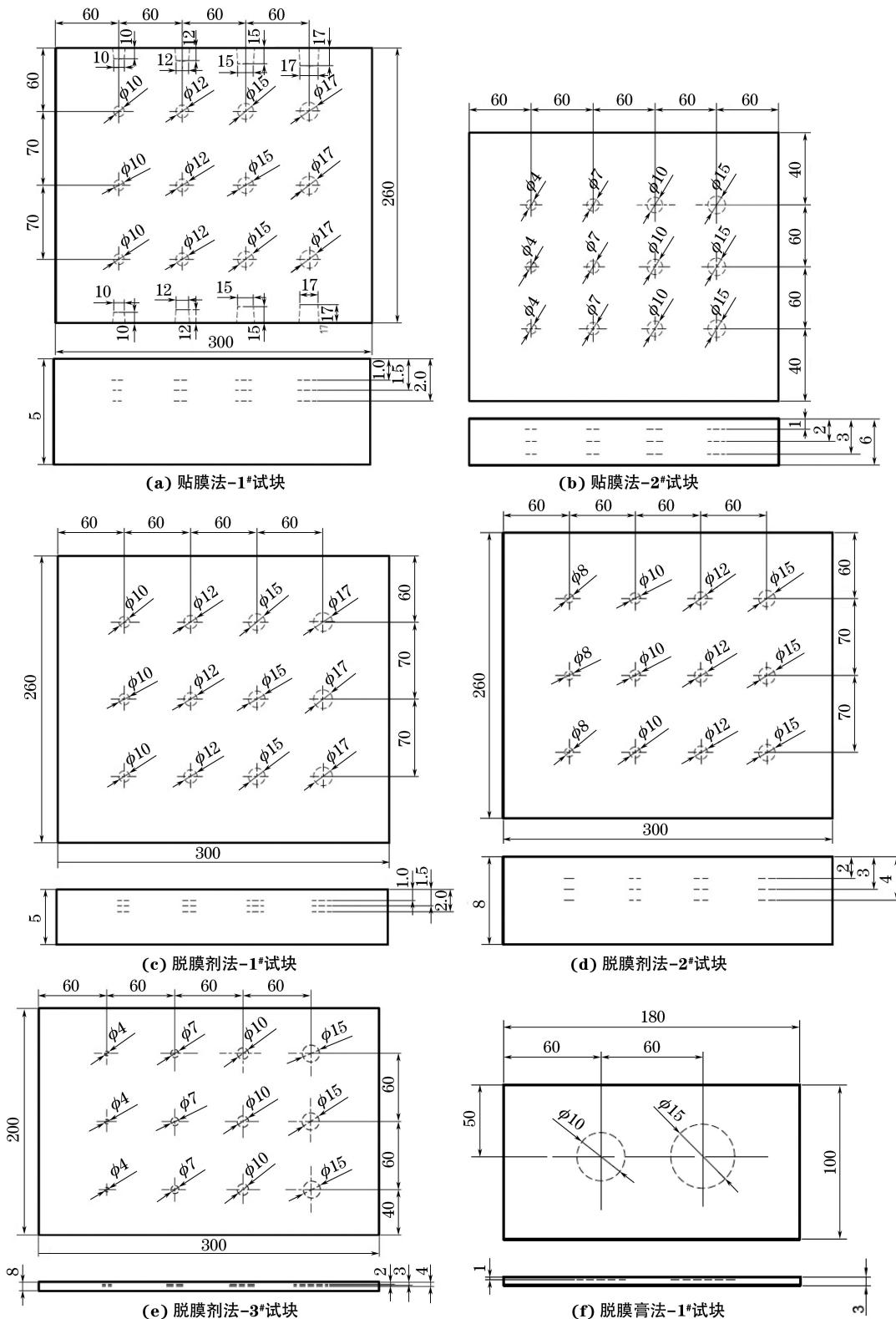


图 2 各对比试块尺寸示意

对人工缺陷的埋深及尺寸进行测量,采用6 dB法分别测得扫查方向及步进方向的测量值,取其平均值作为人工缺陷的测量尺寸。对插拔钢片法制作的缺陷进行测量时,仅采用扫查方向的测量值作为人工

缺陷测量尺寸。各试块的检测数据如表 2 所示。

从水浸超声检测结果可以看出:①对于贴膜法及插拔钢片法制作的试块,各人工缺陷均能有效检出,人工缺陷测量尺寸及埋深与设计尺寸及埋深较

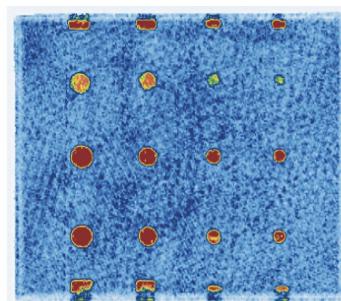


图 3 贴膜法-1# 试块超声 C 扫描结果

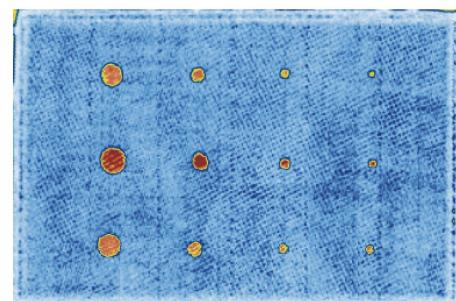


图 4 贴膜法-2# 试块超声 C 扫描结果

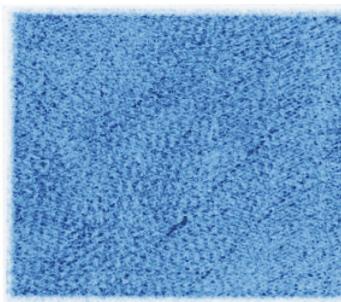


图 5 脱模剂法-1# 试块超声 C 扫描结果

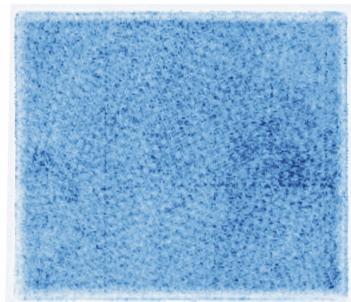


图 6 脱模剂法-2# 试块超声 C 扫描结果

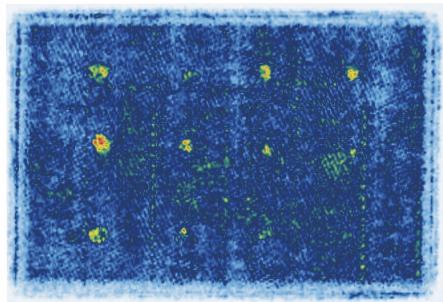


图 7 脱模剂法-3# 试块超声 C 扫描结果

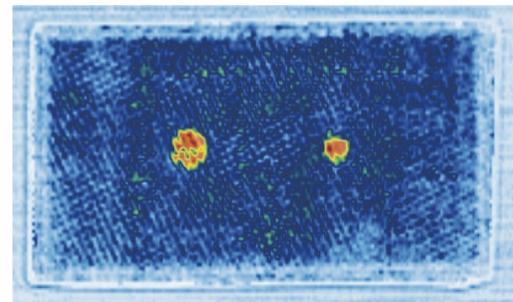


图 8 脱模膏法-1# 试块超声 C 扫描结果

表 2 各试块的检测数据

试块编号	缺陷制作方法	缺陷设计尺寸	缺陷理论埋深	测量尺寸	测量埋深
贴膜法-1#	插拔钢片法	10,12,15,17	1.5	10.8,11.6,17.2,18.5	1.45
		10,12,15,17	2.0	9.6,11.3,15.6,17.9	1.95
	贴膜法	10,12,15,17	1.0	9.1,11.8,15.8,17.3	1.01
		10,12,15,17	1.5	9.3,11.2,14.8,17.8	1.46
	脱模剂法	10,12,15,17	2.0	9.4,11.5,15.4,17.8	1.98
		4,7,10,15	1.0	3.8,6.8,9.9,14.9	3.10
贴膜法-2#	贴膜法	4,7,10,15	2.0	4.1,6.8,10.5,15.2	2.00
		4,7,10,15	3.0	4.0,7.2,10.1,14.9	2.99
脱模剂法-1#	脱模剂法	10,12,15,17	1,1.5,2	—	—
脱模剂法-2#	脱模剂法	8,10,12,15	2,3,4	—	—
脱模剂法-3#	脱模剂法	4,7,10,15	2.0	3.9,6.4,6.4,10.0	2.01
		4,7,10,15	3.0	2.8,4.0,6.2,12.0	3.02
	脱模膏法	4,7,10,15	4.0	6.1,8.1,8.6,9.2	3.91
脱模膏法-1#		10,15	1.0	9.2,14.4	1.00

(下转第 15 页)

数进行确认。采用 32 inch 热熔接头校准试块上不同深度的  $\phi 1$  mm 横孔制作 TCG(距离-波幅)曲线, 采用软件的自补偿修正功能建立基准灵敏度。扫查灵敏度应至少在基准灵敏度的基础上提高 14 dB, 在材料结构噪声太大无法实施检测的情况下, 扫查灵敏度应在基准灵敏度的基础上提高 6 dB 以上。

由于该技术采用的是充水式水楔块, 超声耦合效果是实施现场检测的关键, 检测时可从 3 个方面保证耦合效果。首先, 调整扫查装置的压紧机构和管径调节机构, 确保带曲率的相控阵探头水楔块与管件外表面耦合良好并有足够的压紧力。其次, 对除盐水耦合剂进行消气泡处理, 确保除盐水在喷水过程中无气泡附着在探头和管外壁上。最后, 对 HDPE 管件外表面的不平整进行处理并在扫查前对管外壁进行润湿。

由于 HDPE 热熔接头存在固有的内外表面翻边的情况, 所以检测过程中, 相控阵超声检测图像存在明显的, 有规律性的几何结构信号(见图 11)。检测过程中可以观察该信号的变化, 有效地判断疑似

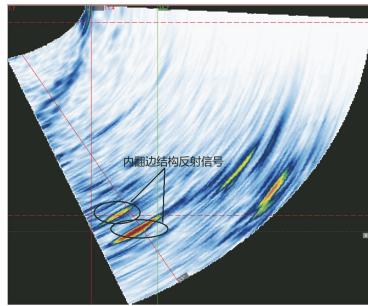


图 11 热熔接头的结构反射信号

(上接第 9 页)

为一致, 并有较好的信噪比; ② 对于脱模剂法制作的试块, 在特定织物层上涂抹脱模剂方法制作的人工缺陷均未检出; 去除两层织物之间的胶层并在缺陷上涂抹脱模剂方法制作的人工缺陷能有效检出, 但信噪比较差, 实际埋深与理论埋深较为一致, 人工缺陷测量尺寸与设计尺寸偏差较大; ③ 对于脱模膏法制作的试块, 各人工缺陷均能有效检出, 人工缺陷测量尺寸及埋深与设计尺寸及埋深较为一致, 但信噪比欠佳。

#### 4 结语

(1) 对采用贴膜法及插拔钢片法制作的人工缺

陷信号。

#### 6.2 检测结果

现场检测结果表明该技术和配套装置可完全满足现场检测的要求, 主要体现在: ① 相控阵探头与配套充水式楔块可有效地适应 HDPE 管道不同的表面状态, 保证超声信号的稳定性; ② 可有效发现 HDPE 管道热熔接头内表面翻边的固有结构信号; ③ 开发的相控阵检测工艺优化了扫查方式, 有效地提高了现场检测的效率。

#### 7 结语

研究解决了壁厚大于 90 mm 的 HDPE 热熔接头全体积范围缺陷检测的难题。试验和现场应用结果均表明开发的检测技术可满足以下指标: ① 缺陷的深度定位精度最大偏差为 4.7 mm, 小于 5% 壁厚; ② 缺陷检测精度不低于  $\phi 0.5$  mm 当量的横孔(壁厚小于 30 mm)和  $\phi 1$  mm 当量的横孔(壁厚大于 90 mm); ③ 缺陷信噪比大于 20 dB, 检测灵敏度余量大于 70 dB。

#### 参考文献:

- [1] 刘世辉, 王艳文, 朱清. 核电厂 SWS 系统阀门腐蚀原因分析和应对措施[J]. 设备监理, 2018(5): 57-61.
- [2] 刘飞华, 任爱, 杨帆, 等. 核电站海水冷却系统的腐蚀与防腐蚀设计[J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(6): 313-316.
- [3] 倪正超, 樊敏江, 钮彬皓, 等. 核安全级架空高密度聚乙烯材料管道设计方法的研究和应用[J]. 压力容器, 2018, 35(10): 31-36.

陷试块进行水浸超声检测, 能有效检出试块中不同埋深及大小的人工缺陷, 可得到较好的信噪比, 同时能够准确定量人工缺陷的大小及埋深。

(2) 对采用脱模剂法及脱模膏法制作的对比试块进行水浸超声检测, 检测效果较差。

#### 参考文献:

- [1] 谢富原. 先进复合材料制造技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2017.
- [2] 刘晶晶. 碳纤维增强树脂基复合材料结构的超声检测[J]. 无损检测, 2016, 38(10): 64-66.
- [3] 刘松平, 刘菲菲. 先进复合材料无损检测技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2017.