

# 树脂基复合材料无损检测标样制备的研究

## Standard Preparation of Resine-Matrix Composites Structure for Nondestructive Inspection

上海飞机制造有限公司航空制造技术研究所 张冬梅 刘卫平 刘奎 于光 周晖  
北京航空航天大学材料科学与工程学院 叶金蕊 张博明 侯进森



张冬梅

博士,副研究员,上海飞机制造有限公司航空研究所复合材料制造技术中心副主任,主任研发工程师,长期从事复合材料结构的制造工艺研究及无损检测技术研究。

树脂基复合材料由于具有高比强、高比模、耐高温、耐腐蚀、耐疲劳、阻尼减震性好、破损安全性好、性能可设计等优点,已发展成为航空航天结构的基本材料。但同时也应该认识到,树脂基复合材料由纤维、基体、界面组成,其微观构造是一个不均匀

由于在铺层等过程中的人为因素以及工艺质量的不稳定性使得复合材料制件的质量具有一定的随机性,不可避免地会有缺陷产生。因此,对其中缺陷的有效检测,是保证复合材料制件质量的必要手段。

和多向异性的多相体系。在复合材料的复合固化成型过程中,预浸料常常会由于吸湿带有水分或者其本身含有小分子杂质、溶剂等挥发性物质,这些极易导致复合材料中形成孔隙、分层等缺陷。同时,由于在铺层等过程中的人为因素以及工艺质量的不稳定性使得复合材料制件的质量具有一定的随机性,不可避免的会有缺陷产生。因此,对其中缺陷的有效检测,是保证复合材料制件质量的必要手段<sup>[1-3]</sup>。

目前,通常使用超声法、射线法、声发射法等无损检测的方法对复合材料缺陷进行检测<sup>[4]</sup>。检测过程中,为了设备运行正常和检测结果的准确度,常需要一系列的标准样品。本文针对树脂基复合材料成型过程中最常见的分层、孔隙、夹杂3种缺陷标样的制备进行了研究<sup>[1]</sup>。

### 试验

#### 1 试验原材料与仪器设备

原材料:预浸料;聚四氟乙烯膜。

设备:BX51M金相显微镜;Panametric 5058PR超声波发射接收仪、超声C扫描控制系统;FJG-YB型热压罐。

#### 2 试验方法

(1)等厚层板。

·中央夹杂缺陷。

设计尺寸为320mm×360mm、厚分别为2mm、4mm、8mm的准各项同性层板。采用直径依次为12mm、9mm、6mm、4mm、3mm、2mm,厚度为0.127mm和0.025mm的聚四氟乙烯薄片(PTFE)模拟夹杂缺陷,较薄的聚四氟乙烯片用两层叠放于一起。铺层过程中将“缺陷”预埋在图1所

示位置。

·边缘分层缺陷。

设计尺寸为 118mm × 270mm、厚为 4mm 的准各项同性层板。采用钢片模拟边缘分层缺陷。铺层过程中将端部剪成梯形的钢片用脱模布包裹并涂抹脱模剂预埋在零件边缘位置。固化成型之后,将钢片拔出,使用树脂将产生的孔洞边缘密封。形成边缘分层的缺陷。

·孔隙缺陷。

采用未压实法和粉末法两种方法模拟孔隙缺陷。未压实法:设计尺寸为 200mm × 300mm、厚为 4mm 的

准各项同性层板。在整个铺层过程中均不使用真空袋进行预压实,铺层完成后直接热压罐固化,希望未经预压实而形成自然孔隙。

粉末法:设计 4 块尺寸为 100mm × 150mm、厚为 4mm 的准各项同性层板,在铺层过程中分别泼洒聚四氟乙烯粉末(PTFE 粉末)、三氧化二铝粉末、铜粉、玻璃微球 4 种粉末,将每种粉末平均分成 5 份,在铺层过程中每隔 3 层预浸料使用 1 份粉末。本试验模拟孔隙率为 2% 的孔隙缺陷,4 种粉末的用量  $\omega$  (质量)按式(1)进行确定<sup>[5-6]</sup>:

$$\omega = 100 \times 150 \times 4 \times 2\% / \rho, \quad (1)$$
式中,  $\rho$  为该粉末的密度,单位为  $\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$ 。

(2)非等厚层板。

非等厚层板按图 2 进行铺放,16 层预浸料宽均裁为 200mm,长按图 2(a)的要求裁剪,且从下至上预浸料方向为准各项同性。图 2(a)中黑色粗线段为模拟缺陷在厚度方向中的位置,图 2(b)则是不同大小模拟缺陷的分布。仍然采用直径分别为 3mm、6mm、9mm,厚 0.127mm 的聚四氟乙烯薄片。

(3)加筋壁板。

本试验模拟了 T 型加筋壁板中的夹杂缺陷,将未固化的 T 型筋条与经过预固化的蒙皮通过共胶接的方式连接在一起。仍然采用厚 0.127mm 的聚四氟乙烯薄片模拟缺陷,缺陷位于 T 型梁两侧与蒙皮的粘接面,均匀排布于 T 型筋条两侧的蒙皮表面内。

## 标准样品的检测和尺寸标定

### 1 超声检测

采用水浸反射板底波衰减法进行检测,使用 Panametric 5058PR 作为超声波探头激励及接收装置,设备参数为 10MHz 探头、激励电压 400V、匹配电阻 100 $\Omega$ 、增益 11dB、扫查步距 0.5mm。检测结果如图 3、4 所示。

### 2 金相显微试验

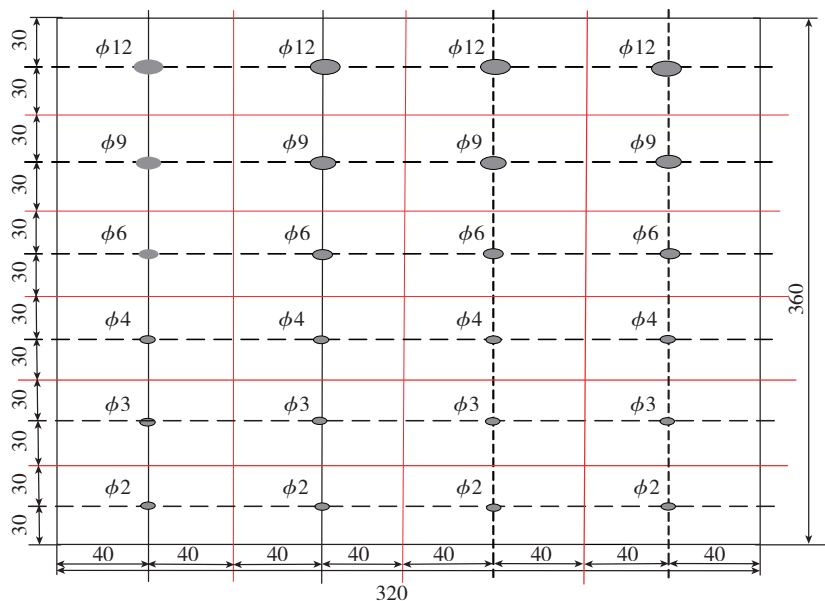
在金相显微镜下放大 50 倍观察,缺陷直径方向截面的金相显微照片如图 5、6 所示。

### 3 标准样品的尺寸标定

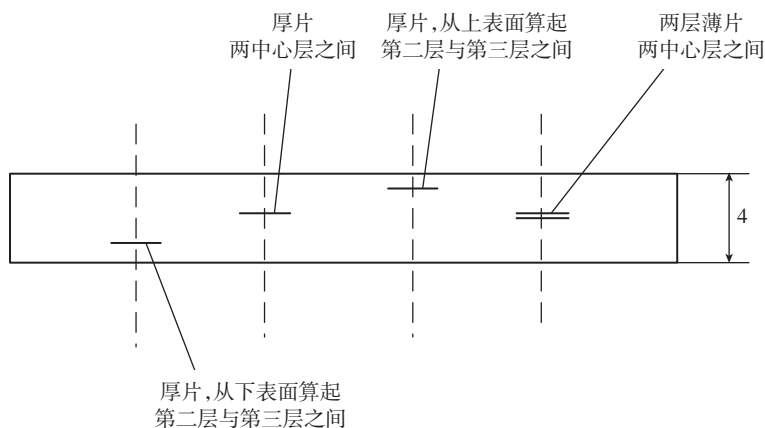
(1)超声水浸反射板底波衰减法。

对试样进行 C 扫描成像,遇到缺陷时,幅值是一个渐变过程,将 C 扫描图像进行彩虹样式映射时,非常直观地体现出幅值的变化过程<sup>[7]</sup>,如图 8 为单个  $\phi 12$  缺陷 C 扫描图谱。

要计算缺陷大小,得选取阈值,对图像进行二值化处理,拟选取阈值:

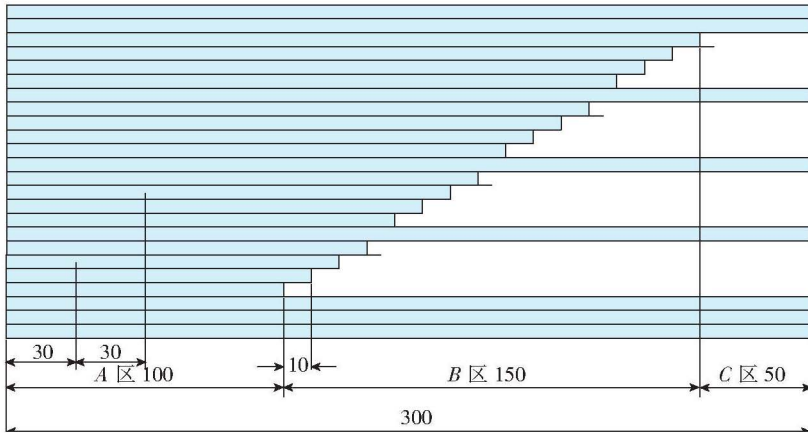


(a)“缺陷”在俯视图中的位置

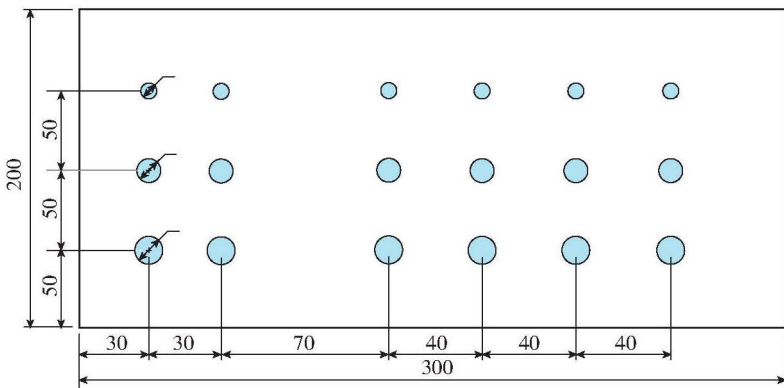


(b)“缺陷”在厚度方向上的位置

图1 “缺陷”在层板中的位置



(a) 长度方向的侧视图



(b) 俯视图中的缺陷位置

图2 非等厚层板

阈值 = 缺陷均值 + (无缺陷处均值 - 缺陷均值) × 相对衰减量。(2)

如图8所示,其中红线示意缺陷中心均值、蓝线示意无缺陷处均值、而黄线即是我们选取的阈值。

根据选取的阈值,对图像数据进行二值化处理,经由黑白映射,图3转变为图9。

预埋缺陷为圆状缺陷,则计算图10中白色圆形区域大小,根据公式(3)计算检测到缺陷直径  $D^{[8-9]}$ 。

$$D = 2\sqrt{\text{缺陷面积} / \pi} \quad (3)$$

(2) 金相显微法。

在金相显微镜下放大50倍观察,使用金相分析软件测得各个试样直径方向上的最大尺寸如表2所示。

### 结果与讨论

(1) 在复合材料成型过程中容易混入杂质从而形成夹杂缺陷。本

研究采用预埋PTFE薄膜的方法制备夹杂缺陷的标准试样。PTFE可以在200℃以上的温度下使用,而本研究中预浸料的固化温度为170℃,因此,固化过程中温度对试样影响很小。而且,从试样的超声C扫描图谱和金相显微照片中可以看出,缺陷的模拟结果和预先的设想基本一致。采用超声法与金相显微法得到的缺陷尺寸与预埋尺寸相吻合。同时,也应该认识到,超声法计算缺陷尺寸得到的结果与选取的阈值有很大的关系。表1显示了不同相对衰减量条件下计算的结果;而使用金相显微法测量缺陷尺寸时,由于磨样

过程和金相观察过程不是同时进行,因此在金相照片中所得到的尺寸有可能并不是其直径方向上的最大尺寸。

(2) 在复合材料成型过程中,由于基体、纤维、模具热膨胀系数不匹配或储存时间过长等原因会导致分层缺陷。本研究在预浸料铺层过程中,在制件边缘夹入钢片,固化成型后拔出钢片,并用树脂密封,模拟分层缺陷。

(3) 孔隙是复合材料成型过程中形成的空洞,是复合材料的主要缺陷之一。本研究采用未压实和添加微粒两种方法模拟孔隙缺陷。未压实法产生的孔隙与实际复合材料成型过程所产生的孔隙缺陷更为接近,但孔隙随机产生不可控;添加微粒的方法可以控制其达到一定的孔隙率,但其实质是在复合材料中混入了颗粒状的杂质与实际孔隙有一定的区别。

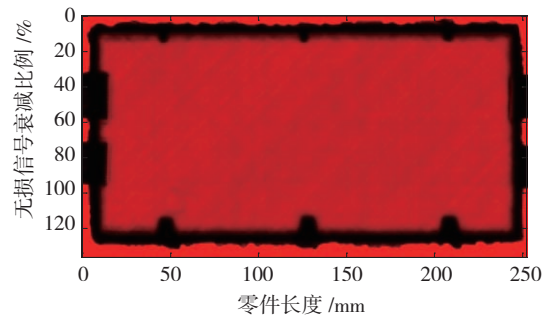


图3 边缘分层缺陷的C扫描图谱

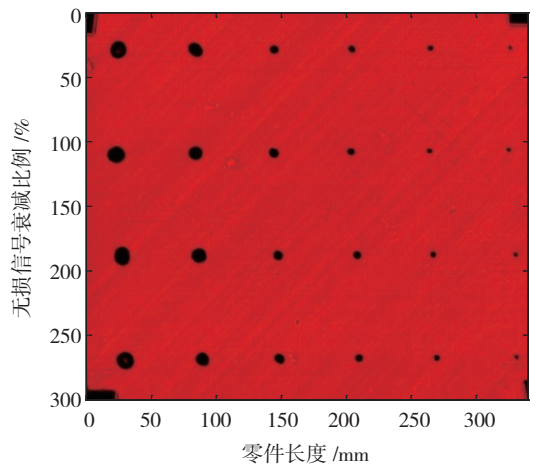


图4 等厚层板中央夹杂缺陷的C扫描图谱

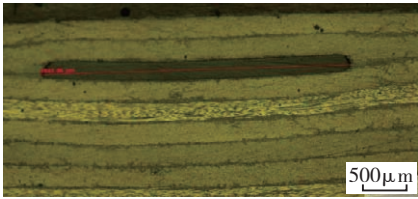


图5 直径为3mm缺陷的金相显微照片

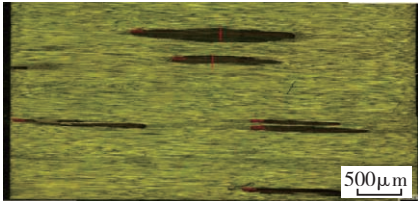


图6 未压实方法模拟孔隙的金相显微照片

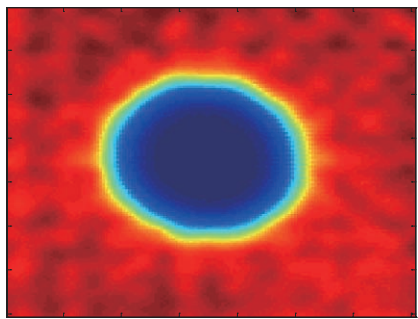


图7 单个 $\phi 12$ 缺陷C扫描图谱

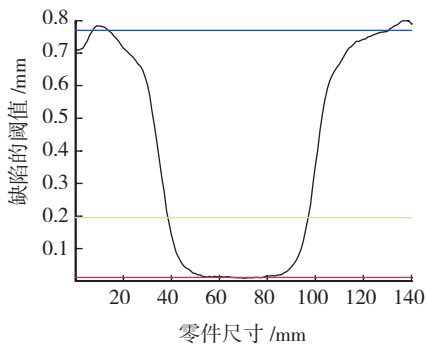


图8 阈值的选取

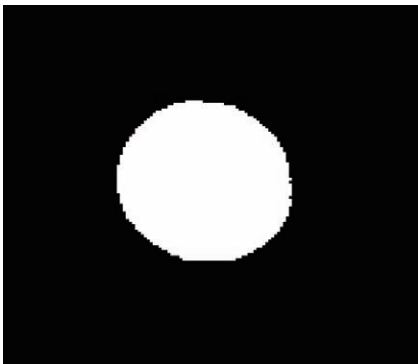


图9 二值化处理后的缺陷图谱

表1 缺陷大小的标定

试样厚度 /mm	接收增益 /dB	相对衰减量	缺陷直径 / mm					
			$\phi 2$	$\phi 3$	$\phi 4$	$\phi 6$	$\phi 9$	$\phi 12$
2	10	0.15	2.0	2.0	2.4	3.3	5.3	7.4
		0.20	2.3	2.4	2.8	3.8	5.9	8.1
		0.25	2.7	2.7	3.1	4.2	6.5	8.8
		0.30	3.0	2.6	3.5	4.5	7.0	9.3
		0.35	3.4	3.3	3.8	4.9	7.5	9.8
		0.40	3.8	3.6	4.1	5.2	7.9	10.3
4	11	0.15	2.1	2.4	2.9	3.9	5.7	7.5
		0.20	2.4	2.7	3.3	4.5	6.4	8.4
		0.25	2.8	3.0	3.7	5.0	7.0	9.1
		0.30	3.1	3.4	4.1	5.5	7.6	9.6
		0.35	3.4	3.7	4.5	5.9	8.1	9.9
		0.40	3.8	4.0	4.8	6.4	8.6	10.7
8	13	0.15	2.6	2.7	3.2	4.3	6.3	8.3
		0.20	3.0	3.1	3.7	4.9	7.1	9.2
		0.25	3.5	3.5	4.2	5.5	7.8	9.9
		0.30	3.9	4.0	4.7	6.0	8.3	10.5
		0.35	4.3	4.3	5.1	6.5	8.9	11.2
		0.40	4.7	4.7	5.6	7.0	9.4	11.8

表2 金相显微观察得到的缺陷尺寸

试样编号	标称直径 /mm	位置	长度 /mm	厚度 / $\mu m$
1	12	中间层	11.547	101.56
2	12	上表层	11.141	241.55
3	9	中间层	8.546	96.65
4	9	上表层	9.002	224.85
5	6	中间层	6.850	106.31
6	6	上表层	5.879	195.65
7	3	中间层	3.143	89.4
8	3	上表层	3.543	229.48
9	2	中间层	2.251	113.53
10	2	上表层	2.351	198.07

(4)整体成型是复合材料的优点和特点之一。在共胶接等整体成型工艺中,胶接面内的缺陷会严重影响其胶接强度。本研究在T型筋条的共胶接过程中,在筋条和胶膜之间、胶膜和蒙皮之间预埋了PTFE,模

拟胶接面的夹杂缺陷。

本文有参考文献9篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 小城)