

铺层参数对层间剪切强度的影响

Effects of the Laminate Stacking Parameter on the Interlaminar Shear Strength

中航复合材料有限责任公司 梁恒亮 陈 静
中航工业第一飞机设计研究院 任远春

[摘要] 本文通过短梁剪切试验法对不同铺层参数的层间剪切强度测试,利用测试的层间剪切强度和分层面积两者比值来检验铺层参数优化的效果。结果表明,对于薄壳类零部件来讲, $[+45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/+45^\circ]$ 的铺层参数得到较高的层间剪切强度和较小的分层面积。

关键词: 短梁剪切试验 铺层角度 铺层顺序 层间剪切强度 分层

[ABSTRACT] By the short-beam shear testing method, a change of the interlaminar shear strength due to the different laminate stacking angle and sequence is discussed. The ratio between the interlaminar shear strength of laminates and the size of the delamination can discover the optimization of the design of the laminate parameter, the result demonstrates: the preferable interlaminar shear strength and the small size of the delamination is obtained by the laminate stacking parameter: $[+45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/+45^\circ]$.

Keywords: Short-beam shear testing method
Laminate stacking angle Laminate stacking sequence
Interlaminar shear strength Delamination

复合材料由于具有比强度、比刚度大和可设计性强、良好的抗疲劳损伤性能和耐腐蚀性能等优点,而广泛应用于航空航天部件中,复合材料部件的应用比例和范围日益增加,现已成为四大航空材料之一^[1-2]。但是复合材料层压板抵抗层间应力的能力较差,尤其对于薄壳类层压板构件,层间分层将会严重降低层压板的刚度和强度,是复合材料层压板破坏或失稳的重要原因^[1-2]。利用复材的铺层优化来提高复合材料的层间强度即层间抵抗分层破坏的能力是可行的,同时也体现了复合材料独特可设计性的特点。

复合材料的优势之一是材料具有可设计性^[1]。因此,可通过设计和优化复合材料层压板各铺层参数——铺层角度和铺层顺序来获取较高的复合材料层间剪切强度,以期达到避免或减缓层间分层破坏的目的。本文通过对不同铺层参数的玻璃钢复合材料层压板采用短梁剪切试验测试,分析了层间剪切强度和分层面积大小,并通过对比为一些要求层间强度较高和出现分层后

能阻止分层扩展的构件提供了基本工艺经验,同时对其树脂和纤维的复合材料构件也具有参考价值。

1 实验部分

1.1 原材料

试验树脂基体材料为 BA9913 环氧树脂(北京航空制造工程研究所研制),增强材料为 SW220 缎纹布(南京玻璃钢研究所),单层厚度 0.2mm,面密度为 220g/m², SW220/BA9913 预浸料(北京航空制造工程研究所制备),树脂含量 38%~42%,幅宽 1000mm。

1.2 工艺制备

各试样的铺层设计参数中:铺层角度为通用角度 -0° 、 90° 、 $+45^\circ$ 、 -45° ,具体见表 1。测试预浸料性能的试样为对称层合板,成型工艺采用零吸胶常温加压的真空气袋-热压罐成型,固化工艺见图 1。

1.3 测试条件

根据标准 JC/T773-92 进行层间剪切强度测试,根据不同试样的厚度调节跨距,以减小因厚度不同带来的误差;试验采用位移控制连续加载(Z100 电子万能材料试验机),加载速度 2mm/min,一组试验试样为 7 个,层间剪切试验夹具跨距为 5 倍试件厚度;测试环境为试验温度 $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$,环境湿度为 $(28 \pm 3)\%$;利用 3D FAMILY 影像测量仪测其分层面积,精度为 $0.001\text{mm} \times 0.001\text{mm}$,见图 2。

1.4 计算公式^[3]

层间剪切强度按式(1)计算:

$$\tau_s = \frac{3P}{4b \cdot h}, \quad (1)$$

式中: τ_s 为层间剪切强度, MPa; P 为试样破坏时的最大载荷, N; b 为试样宽度, mm; h 为试样厚度, mm。

2 结果与分析

2.1 试样破坏

通过试样破坏状态,均为合理的层间剪切破坏形式即为层间单剪切破坏形式、多层剪切破坏和剪切拉伸破坏其中之一^[4]。

2.2 试验结果

表 1 各批样件的铺层参数

| 类别编号 | 铺层参数 |
|------|--|
| 1 | $[+45^\circ / -45^\circ]_{3s}$ |
| 2 | $[+45^\circ]_{5s}$ |
| 3 | $[(+45^\circ / -45^\circ)2/0^\circ / 90^\circ]_s$ |
| 4 | $[-45^\circ]_{5s}$ |
| 5 | $[-45^\circ / 0^\circ / +45^\circ / 90^\circ / -45^\circ]_s$ |
| 6 | $[+45^\circ / 90^\circ]_{3s}$ |
| 7 | $[90^\circ / +45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 0^\circ]_s$ |
| 8 | $[+45^\circ / -45^\circ / 0^\circ / 90^\circ]_s$ |
| 9 | $[0^\circ / 90^\circ]_{3s}$ |
| 10 | $[+45^\circ / 90^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 0^\circ]_s$ |
| 11 | $[+45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 90^\circ]_s$ |
| 12 | $[0^\circ]_{5s}$ |
| 13 | $[90^\circ]_{5s}$ |
| 14 | $[0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 90^\circ]_s$ |
| 15 | $[+45^\circ / 0^\circ / 2 / -45^\circ / 90^\circ]_s$ |
| 16 | $[+45^\circ / 90^\circ / 2 / -45^\circ / 0^\circ]_s$ |
| 17 | $[0^\circ / +45^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 0^\circ]_s$ |
| 18 | $[0^\circ / -45^\circ / 0^\circ / +45^\circ / 90^\circ]_s$ |
| 19 | $[0^\circ / +45^\circ]_{3s}$ |
| 20 | $[90^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 0^\circ]_s$ |
| 21 | $[0^\circ / 90^\circ / +45^\circ / -45^\circ]_s$ |
| 22 | $[0^\circ / 90^\circ / -45^\circ / +45^\circ]_s$ |
| 23 | $[+45^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 0^\circ]_s$ |
| 24 | $[+45^\circ / 0^\circ / 0^\circ / -45^\circ]_s$ |
| 25 | $[+45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 90^\circ / +45^\circ]_s$ |

注：表中 0° 即为织物的经向、 90° 为其纬向，采用角度标示是借鉴单向带的表示方法。

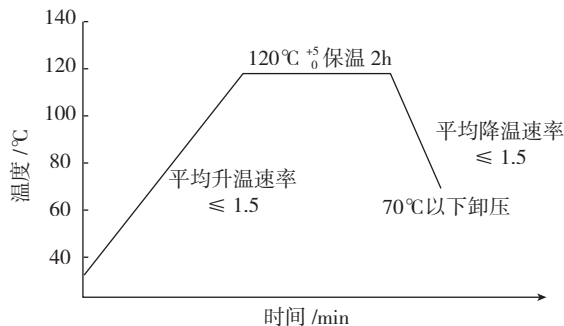


图1 SW220/BA9913固化工艺

Fig. 1 Curing technical sketch map of SW220/BA9913

层间剪切强度和分层面积大小，及强度与分层面积的比值见表 2。从表 2 中可以看出，在各数据离散系数和含胶量波动较小情况下， $[0^\circ]_{5s}$ 铺层其强度较高达 67.53 MPa，分层面积也较大达到 42.79mm^2 ，强度分层面积比值为 1.58； $[+45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 90^\circ / +45^\circ]_s$ 铺层其强度为 64.02 MPa，分层面积较小为 27.86mm^2 ，强度分层面积比值为 2.30； $[+45^\circ / -45^\circ]_{3s}$ 强度较小为 45.57 MPa，分层面积较大为 61.16mm^2 ，强度分层面积比值为 0.74。

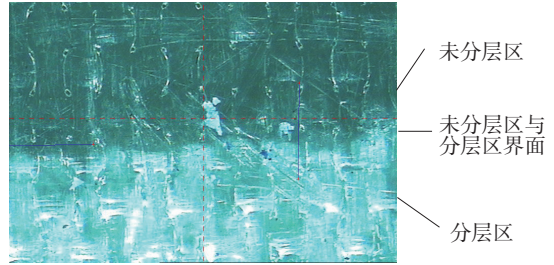


图2 分层试样图

Fig.2 Picture of specimen : delamination

表 2 中批次编号按强度分层面积比递增排列为 1~25，比值数据可以划分 3 类铺层。

(1) 较差铺层，比值小于 1.0 铺层为 $[+45^\circ]_{5s}$ 、 $[-45^\circ]_{5s}$ 、 $[+45^\circ / -45^\circ]_{3s}$ 、 $[(+45^\circ / -45^\circ)2/0^\circ / 90^\circ]_s$ ；(2) 较好的铺层，比值大于 2.0 的为 $[+45^\circ / 0^\circ / 0^\circ / 90^\circ]_s$ 、 $[+45^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 0^\circ]_s$ 、 $[+45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 90^\circ / +45^\circ]_s$ ；(3) 其余铺层比值处于 1.4~2.0 之间。

2.3 分析

把表 2 中数据做成柱状曲线图，如图 3 所示。

联系表 1 可以看出层间剪切强度较大为 67.53MPa，铺层为 $[0^\circ]_{5s}$ ，层间剪切强度较小的为 45.57MPa，铺层为 $[+45^\circ / -45^\circ]_{3s}$ ；分层面积较大的为 61.16mm^2 ，其铺层为 $[+45^\circ / -45^\circ]_{3s}$ ，分层面积较小的为 26.65mm^2 ，其铺层 $[+45^\circ / 0^\circ / 0^\circ / -45^\circ]_s$ ；强度与分层面积比值较大数值是 2.297，其铺层 $[+45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 90^\circ / +45^\circ]_s$ ，比值最小的数值是 0.745，铺层 $[+45^\circ / -45^\circ]_{3s}$ 。

分析层压板的加载过程，首先树脂基体把外部集中载荷作用传递给纤维，纤维把轴向载荷传给相邻的具有相同取向的纤维，以及相邻的取向与初始加载方向不同的铺层，因此剪切断裂往往发生在沿最大载荷方向取向的铺层内或这些铺层的附近^[1]。外加集中载荷作用于层压板的方向与层压板中较多纤维方向一致时，更多的纤维起到了分散和承载破坏载荷的作用，这样只有在较大的载荷作用下，才能使纤维和树脂界面发生破坏，因此具有较高的层间剪切强度，如 $[0^\circ]_{5s}$ 铺层，反之，强度较低，如 $[+45^\circ / -45^\circ]_{3s}$ 。此外，由于树脂基体的强度较纤维差一个数量级^[5]，故在外部集中载荷作用下，若该层压板纤维方向分布较均匀，树脂基体可以把外部集中载荷作用传递给各向纤维，连续纤维把集中载荷传递到层压板各个部位，分散了外部集中载荷，可承载较高的载荷作用；随着载荷增加，没有纤维增强的树脂区域即相邻层的树脂区域首先发生微裂纹，裂纹扩展进而相邻层发生小面积分层^[4,6]，该处丧失承载和传递载荷的能力；随着载荷增大，该分层逐渐扩大，相邻层失稳，从而该层压板成为非对称层压板，层压板是由相互独立的单层构成，这样铺层各个单层会阻止相邻层失稳的影响，但是

表2 各批样件测试结果

| 批号 | 含胶量 /% | 层剪强度 /MPa | 离散系数 /% | 分层面积 /mm ² | 比值 |
|----|--------|-----------|---------|-----------------------|----------|
| 1 | 34.43 | 45.57 | 1.95 | 61.16 | 0.745095 |
| 2 | 33.98 | 52.28 | 3.70 | 58.71 | 0.890479 |
| 3 | 35.52 | 49.32 | 2.02 | 52.55 | 0.938535 |
| 4 | 33.89 | 52.28 | 2.84 | 52.79 | 0.990339 |
| 5 | 35.05 | 65.28 | 1.66 | 47.29 | 1.380419 |
| 6 | 33.80 | 58.13 | 1.21 | 39.94 | 1.455433 |
| 7 | 33.78 | 60.18 | 2.37 | 39.55 | 1.521618 |
| 8 | 32.71 | 54.84 | 3.66 | 35.94 | 1.525876 |
| 9 | 33.81 | 62.68 | 2.75 | 41.06 | 1.526547 |
| 10 | 35.39 | 63.28 | 1.40 | 40.27 | 1.571393 |
| 11 | 34.09 | 64.58 | 2.28 | 41.03 | 1.57397 |
| 12 | 33.75 | 67.53 | 3.18 | 42.79 | 1.578172 |
| 13 | 34.04 | 61.7 | 3.73 | 38.99 | 1.582457 |
| 14 | 34.10 | 61.9 | 5.57 | 38.9 | 1.59126 |
| 15 | 34.96 | 62.26 | 2.14 | 38.52 | 1.616303 |
| 16 | 33.23 | 60.75 | 2.25 | 35.94 | 1.690317 |
| 17 | 33.23 | 65.90 | 5.03 | 38.72 | 1.724228 |
| 18 | 32.84 | 64.80 | 1.25 | 37.11 | 1.74616 |
| 19 | 35.23 | 63.95 | 1.67 | 36.18 | 1.767551 |
| 20 | 32.65 | 63.27 | 0.67 | 35.49 | 1.782756 |
| 21 | 32.68 | 67.09 | 0.97 | 35.95 | 1.866203 |
| 22 | 33.54 | 63.94 | 2.86 | 33.88 | 1.887249 |
| 23 | 34.02 | 59.26 | 1.91 | 29.3 | 2.022526 |
| 24 | 34.84 | 59.64 | 3.51 | 26.65 | 2.237899 |
| 25 | 34.80 | 64.02 | 1.63 | 27.86 | 2.297918 |

注：表 2 中每类样件为 7 个试件的平均值，比值为层间剪切强度与分层面积之比。

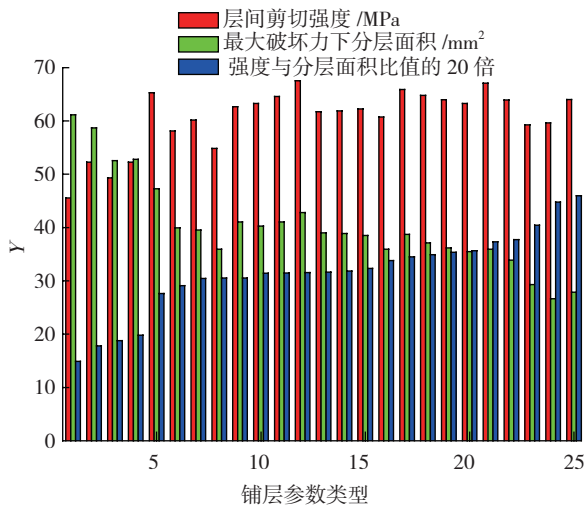


图3 铺层参数对比值的影响

Fig.3 Effect of the laminate stacking parameter on the ratio

随着外集中载荷的增加,可以独立承载的单元数量进一步减少,同时在外集中载荷作用下非对称层压板产生

的耦合效应,共同加剧了层压板的分层扩展,所以树脂基体沿最先出现的分层点扩展,相邻层分层面积逐层增加,宏观表现为与垂直于铺层面方向呈 45° 裂纹线,其实就是分层面积逐渐扩大所至,直至整个层压板强度突降直至失稳。

不同铺层参数具有不同的测试结果,对比图 3 中的 [+45°/0°/-45°/90°/+45°]_s 与 [+45°/0°/-45°/90°]_s 两者层间剪切强度值均较大,前者因 +45° 铺层比例增加且 +45° 铺层置于层压板中间,能够较好地阻止分层扩展,其分层面积较小为面积为 27.68 mm² 远小于后者的 41.03 mm²,这意味对于以抗层间剪切为主的构件,增加 +45° 铺层且使其处于中间层可以减小分层面积,使得层压板具有更好的稳定性,具有更好的抵抗破坏失稳的能力,同时具有一定的二次承载能力,达到强度与分层面积两者比值较小的理想铺层层压板目标。

观察 [+45°/-45°]_{3s} 铺层和 [(+45°/-45°)₂/0°/90°]_s,

(下转第 85 页)

变化图可用于自动化系统分析软件的开发。

孔隙密度指示:当优区底波为满屏幕的80%时,穿过时基线信号低于屏幕20%并伴随严重的底波衰减的多个指示,可以定义为孔隙密度。为了确保分层不在孔隙密度处出现,传感器需要更换到低频段,尤其是在高衰减孔隙密度区域,波长越长孔隙密集灵敏度越低,但是也越容易发现孔隙密集处的分层。在给定工件厚度的作为dB值变换百分比的孔隙密集的相关性可有孔隙率表确定,在适当的工件技术单中可找到。超声波方法和极值由特定的超声波检测系统通过自己的分析软件给定,同时,参考合适的规程和/或技术单。

7 完善本公司全碳纤维复合材料飞机批量零件验收标准探析初步意见

(1)根据航空零件结构强度设计原理,先将其分为关键(主要)承力件、重要承力件、一般件,有利于相关件分类理论计算,损伤容限试验,科学合理指定验收标准。

(2)同一部件的不同部位,由于受力大小、受力方向、设计厚度、损伤容限不一致,验收标准应该按各部位实际受力状况制定是符合试验科学依据的。

(3)多个缺陷的损伤容限评估评估比较复杂,本文参照各国现有相关标准,通过一一验证,就各缺陷面积评估;多个超声波波形可分辨缺陷面积累计、超声波波形难以分辨的密集缺陷面积评估方法、缺陷区域间距离的容限;作了多个公式化计算描述,是综合不同性质类型缺陷区别对待,比较切合实际。

(4)目视检测。

目视检测是防备与飞机安全有关破坏的第一道防线,由于碳纤维复合材料零件未经车铣刨磨等切削加工,表面缺陷种类多,危害大,尤其关键。但必须要有专门检测工序,专门检测工艺规范,还要有相应对比试块或照片标准。才能和国际接轨,纳入无损检测的验收标准。

(5)孔隙率无损检测。

是目前公认的无损检测方法,虽然还没有统一的办法倒有基本一致的要求,即碳纤维复合材料飞机零件必须通过孔隙率无损检测,利用超声对孔隙率衰减规律,根据被检碳纤维复合材料的铺层厚度,加压加温固化工艺,进行超声衰减图表测绘建立变厚层压的孔隙率定量评估。

本文通过上述检测和试验探析,为全碳纤维复合材料飞机零件无损检测验收标准的制定提供了更加精确并切合实际的科学方法。为进一步完善我公司全碳纤维复合材料飞机零件无损检测验收标准,改进加工工艺,提高产品质量进行行之有效的无损检测做了有益的探索。

(责编 亿霖)

(上接第80页)

发现其层间剪切强度仅为45.57 MPa和49.32 MPa,而分层面积均较大达到了61.16 mm²和52.55 mm²,在外载荷作用下,面内与外部集中载荷作用方向一致的纤维少,而且纤维过于集中,没有纤维增强的树脂面积过大,树脂在较小的外部集中载荷作用下,发生微裂纹且因为没有纤维增强而容易扩展进而树脂大面积丧失承载能力,同时层间发生分层很快使整个层压板成为非对称结构,进而在外载荷和耦合效应共同作用下,在很小载荷作用下加速层压板层间和层内大面积分层而失稳破坏;因此铺层工艺设计时应加以考虑,可在+45°与-45°铺层之间用0°与90°隔开,以期达到提高强度的目的。

另外,铺层顺序对分层面积影响亦较大,[-45°/0°/+45°/90°/-45°]_s与[+45°/0°/-45°/90°/+45°]_s两者仅仅变化了+45°和-45°顺序,结果在强度值相差不大的情况下,两者分层面积分别为47.29mm²和27.86 mm²,致使强度与分层面积比值为1.38和2.23相差较大,再第二次重复试验中仍然得出相似结果;同样,把+45°与0°、+45°与90°更换,如第20类、第7类,结果显示,把+45°放在最外层可在强度基本不变的条件下,有效阻止在外部集中载荷作用下层压板的分层扩展。

从图3中数据说明了层间剪切强度和分层面积大小没有反比关系,即层间剪切强度越高,分层面积越小,而是两者之间因为铺层参数的改变而相应的具有性能优劣关系。

3 结论

(1)层压板抗层剪能力和分层面积大小与铺层之间铺层参数有直接关系,其中[+45°/0°/-45°/90°/+45°]_s抗剪切能力和分层面积比较优异;(2)+45°/-45°铺层之间尽可能用0°和90°隔开,以提高层压板的抗层剪和分层破坏的能力;(3)层压板最外层铺叠+45°铺层,可有效阻止分层扩展,且能得到较高的剪切强度;(4)强度和分层面积之间没有线性关系,强度越大分层面积越小。

参考文献

- [1] 赵渠森,郭恩明.先进复合材料手册.北京:机械工业出版社,2003.
- [2] 航空航天工业部科学技术研究院.复合材料设计手册.北京:航空工业出版社,1990.
- [3] 王连玉,秦志敬,杨乃斌,等.单向纤维增强塑料层间剪切强度试验方法(GB 3357-82).北京:中国标准出版社,1982.
- [4] 曾庆敦,张宁.正交叠层板横向初始开裂问题的研究.华南理工大学学报,2004,32(7):60-64.
- [5] 陈祥宝.聚合物基复合材料手册.北京:化学工业出版社,2004.
- [6] 杨慧.复合材料层合板三点弯曲损伤失效数值研究.燃气涡轮试验与研究,2006,19(4):38-42.

(责编 深蓝)