

复合材料褶皱与试件性能的关系研究*

Experimental Investigation on the Relationship Between Wrinkles and Properties of Composite Laminates

中航复合材料有限责任公司 卓鹏 刘强 赵龙 姜茂川
中国商用飞机有限责任公司北京民用飞机技术研究中心 陈志平 张璇 丛晶洁

[摘要] 褶皱是复合材料成型中产生的一种工艺缺陷,而这种缺陷会对试件的性能产生不可忽略的影响。本文通过褶皱的宽高比来衡量褶皱缺陷的严重程度,并通过实验的方法研究不同宽高比的褶皱对试件性能的影响。本实验设计了5组不同宽高值的褶皱缺陷,并利用液体成型工艺制造出带有不同设定宽高值的褶皱缺陷试样。通过测试试样的开孔压缩强度,来衡量褶皱对复合材料性能的影响。

关键词: 褶皱 开孔压缩 液体成型 宽高比

[ABSTRACT] Wrinkles within the composite laminates are process defects which can be formed during the manufacturing process. They may have minor or even severe effect on the properties of the composite products. In this paper, wrinkles within the composite laminates are estimated by their length/height ratio, and samples with wrinkles of different length/height ratio are investigated in the experiment. Five groups of samples with wrinkles of different length/height ratio are manufactured by resin infusion process. The effect of the wrinkles within the laminates is evaluated by the open hole compression strength of the laminates.

Keywords: Wrinkles Open hole compression Resin infusion Length/height ratio

复合材料被越来越广泛地应用于航空、汽车、风力发电等领域,且尺寸越来越大,结构也越来越复杂。而传统的预浸料/热压罐工艺由于其昂贵的制造成本使其发展受到了一定的制约。因此,近年来以RTM(Resin Transfer Molding)和VARI(Vacuum Assisted Resin Infusion)等为代表的复合材料液体成型技术由于不需要使用投资成本较高的热压罐及预浸料设备,制造成本显著低于传统的预浸料/热压罐工艺,并具有良好的可

设计性及适合于成型整体结构复杂构件等优点,被越来越广泛地应用于高性能复合材料成型制造领域。其中VARI工艺适用于大尺寸复合材料构件的成型。由于构件尺寸较大以及结构较为复杂,难以避免其中出现纤维褶皱等缺陷。

复合材料褶皱是指复合材料内部的一层或多层纤维在复合材料的表面或内部形成的折痕、皱纹或弯曲变形。这种褶皱是由纤维的弯曲、扭曲以及纤维层间的偏移所造成的一种状态,其产生的原因主要有:(1)堆叠后的干态纤维帘子布之间无定型剂固定,预制体堆叠块在移动、组合、裁边、缝合及合模过程中出现层间滑移变形;(2)非贴膜面的纤维层由于受压不均匀产生层间扭曲变形;(3)真空袋或局部纤维预制体架桥(如R区)导致纤维预制体局部受压不均而产生纤维层变形;(4)其他人为原因,如:层间夹杂、贴膜面存在异物等原因导致了复合材料褶皱的形成。复合材料褶皱可导致材料性能大幅下降,如拉伸、压缩强度以及疲劳寿命等,使复合材料的性能值偏离预期设计值,无法在正常的条件下使用。J.Fish等人对复合材料褶皱对性能的影响进行了模拟和有限元分析^[1-4],本文着重从实验方面对复合材料褶皱的影响进行研究。

1 试验规划

为了评估褶皱对复合材料性能的影响,预制带有不同宽高比褶皱缺陷的试件。通过测试试验件的开孔压缩强度,考察褶皱对复合材料性能的影响。

假设复合材料表面的褶皱为一单曲面圆弧,且上下表面弧度近似相等,如图1所示。设材料表面褶皱的跨度为 l ,褶皱凸起的高度为 h 。因此,将材料表面褶皱的宽高比定义为 $l:h$ 。

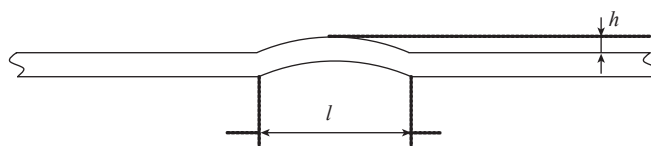


图1 褶皱宽高比定义示意图

Fig.1 Definition of aspect ratio of composites wrinkles

* 本研究受国家高技术研究发展计划(863计划)“先进轻质复合材料成型技术与装备开发与典型应用”项目的资助,项目编号2012AA040209。

开孔压缩试验件按 ASTM D8464 研制,尺寸为 300 mm × 36mm,试件中心开孔直径为 $\Phi 6$ 。褶皱的方向垂直于试样长边的方向。开孔压缩试验件的材料选用 U-3160/BA9914,纤维铺层为 $[+45/0/-45/90]_{3s}$ 。试件利用高纤维体积分数真空转移成型技术(HFVI)成型制造^[5],该工艺可较好地克服常规预制体受压不匀的缺点,使制备的试验件具有较高的厚度均匀性,防止产生试验件内部褶皱对试验件的性能测定产生二次偏差。

本次试验共设计了 5 组宽高比的褶皱缺陷,并与无褶皱缺陷的试样进行对比,具体试验设计如表 1 所示。

表1 试验设计褶皱与褶皱位置

实验组	1	2	3	4	5	6
宽高比 $l:h$	无褶皱	5:0.5	10:0.5	20:0.5	20:1.5	30:1.5

2 结果与讨论

褶皱试件的开孔压缩强度值见表 2。

表2 褶皱试件开孔压缩强度测试结果

褶皱宽高比	组别	强度/MPa	最大值/MPa	最小值/MPa	变异系数 Cov/%
无褶皱	1	338.33	340.24	335.38	0.77
5:0.5	2	255.88	259.22	249.42	2.19
10:0.5	3	262.32	265.54	256.12	2.05
20:0.5	4	265.8	274.07	257.65	2.73
20:1.5	5	255.7	262.81	251.75	2.41
30:1.5	6	287.19	297.73	272.53	4.56

根据表 2,对复合材料褶皱与开孔压缩强度关系分析如下。

2.1 相同褶皱高度,不同褶皱宽度的试验结果对比

比较组别 1、2、3 和 4,可得出在固定褶皱高度 h 为 0.5mm 时,改变褶皱的宽高比对开孔压缩强度的影响,如图 2 所示,其中“**I**”表示压缩强度最大值。

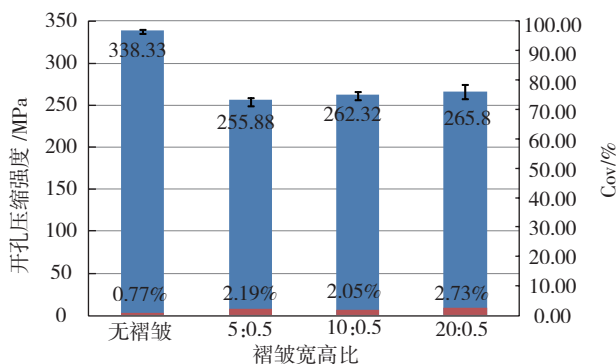
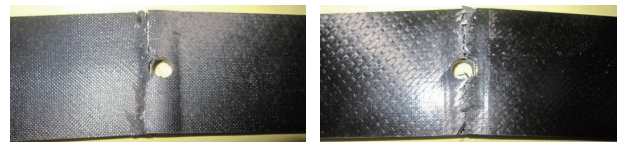


图2 固定高度,改变褶皱宽度

Fig.2 Increase the length of wrinkles while fix its height

从图 2 可以看出,当试件带有预制褶皱缺陷时,试

件的开孔压缩强度下降了约 21%~24%,表明褶皱缺陷对试样的性能有较大的影响。当固定褶皱的高度 t ,增加褶皱的宽度 l ,试件的开孔压缩强度随褶皱宽度的增加而开始提升。其原因是随着宽度的增加,褶皱趋于平缓,褶皱对试件的影响越小。试件的破坏形式见图 3。



(a) 褶皱凸面 (b) 褶皱凹面

图3 褶皱宽高比为10:0.5的试样的破坏模式

Fig.3 Failure mode of samples with wrinkles of 10:0.5 length/height ratio

2.2 相同褶皱宽度,不同褶皱高度的试验结果对比

比较 1、3 和 4 组,可得出相同褶皱宽度,不同褶皱高度的试验结果。从图 4 可以看出,随着褶皱高度的升高,褶皱的坡度增加,开孔压缩强度随之降低。对比图 3 和图 5,第 4 组试样的破坏模式不同于第 3 组。第 4 组试样的双侧均在褶皱边缘破坏,由此可推测,在褶皱宽高值为 20:1.5 时,褶皱对开孔压缩强度的影响要高于孔的影响,从而破坏仅仅发生在褶皱处。

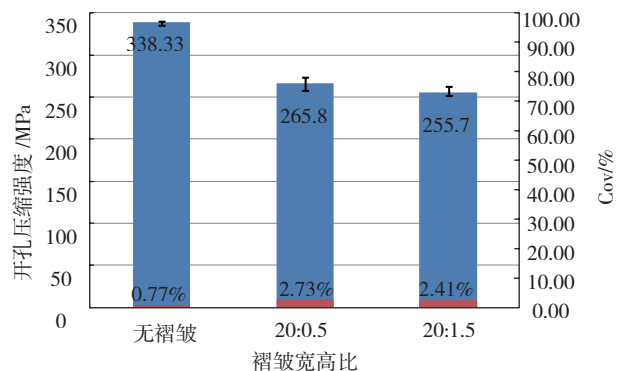


图4 固定宽度,改变褶皱高度

Fig.4 Increase the height of wrinkles while fix its length

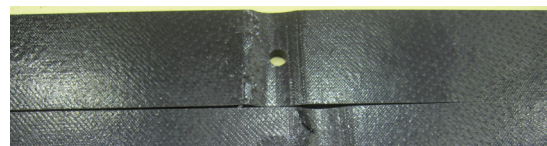


图5 褶皱宽高比为20:1.5的试样破坏模式

Fig.5 Failure mode of samples with wrinkles of 20:1.5 length/height ratio

2.3 相同宽高比,不同褶皱高度和宽度的试验结果对比

比较组别 1、2 和 6 组,考察在相同的褶皱宽高比下,不同的宽高值对开孔压缩性能的影响。从图 6 可知,在褶皱的宽高比固定的情况下,试件的开孔压缩强度随褶皱的宽高值增大而增大。两组试样的破坏模式均在褶皱的凸起侧,试件在褶皱边缘破坏;在褶皱凹陷侧,试件在褶皱与孔叠加区中间破坏。同时,褶皱的宽高值较大

(下转第 105 页)

表3 叠层板厚度及沿厚度方向树脂含量

叠层块	24层			36层			46层			66层			备注
	理论厚度/mm	实际厚度/mm	树脂含量/%	理论厚度/mm	实际厚度/mm	树脂含量/%	理论厚度/mm	实际厚度/mm	树脂含量/%	理论厚度/mm	实际厚度/mm	树脂含量/%	
1		2.81	28		4.40	30		5.60	30		8.12	31	无损检测合格孔隙含量<1.5%
	2.88			4.32			5.52			7.92			
2		2.77	27		4.44	31		5.46	28		8.16	31	

梁宪珠等^[3]还对该公式进行了实验验证,固化后叠层板厚度及制件沿厚度方向树脂含量见表3。从区域厚度看,吸胶材料实际吸树脂量与设定的基本相符,相对厚度误差 ≤ 0.05 ,说明设定的吸胶材料比较准确,同时也证明吸胶系统公式比较可靠。

4 结束语

(1) 预吸胶过程对厚制件的成型非常重要,有助于将厚层板压制密实,并能得到合理的纤维体积含量和最低的孔隙率。针对不同树脂,可以采用零吸胶工艺。

(2) 针对不同的树脂基体和成型构件结构应选用不同的吸胶材料。同时,吸胶材料单位面积吸树脂量,两层或两层以上不是单层的倍数,其吸树脂量与树脂流动性及气路有关,应分别测定。

(3) 吸胶系统计算公式对吸胶材料的选择有重要的参考价值。

参考文献

[1] 王科,顾轶卓,李敏,等.零吸胶工艺复合材料层板成型质量与预浸料特性关联分析.玻璃钢/复合材料,2011(3):28-33.
 [2] 董云明,倪荣根.复合材料成形工艺用吸胶材料应用研究.材料工程,1994(12):37-38.
 [3] 梁宪珠,谢向莉,韩立军,等.叠层成型用吸胶材料吸树脂量分析.玻璃钢/复合材料,1997(4):15-20.
 [4] 梁宪珠.热压罐法复合材料成形吸胶系统的计算及预浸料树脂含量的选择.航空工艺技术,1996(1):5-8. (责编 深蓝)

(上接第102页)

的第6组的开孔压缩强度更高,其原因是褶皱的边缘离开孔位置较远,因而褶皱边缘处受压时的失稳对孔的影响较小。

3 结论

本次试验用褶皱的宽高比来表征复合材料褶皱的状态。运用新型HFVI工艺制得了带所设计宽高比褶皱的试样。共考察了5组不同宽高值的褶皱以及不同

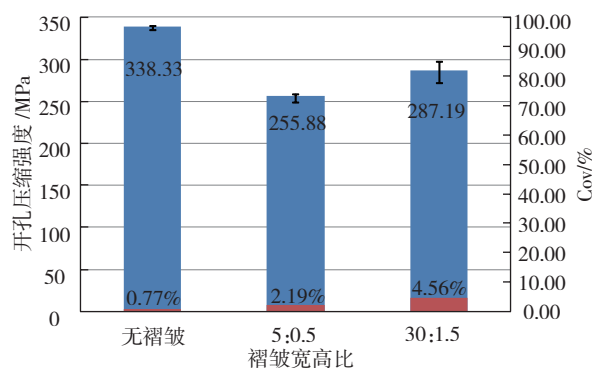


图6 相同宽高比,不同宽高值

Fig. 6 Open hole compression strength of samples with the same length/height ration but different length/height value

宽高值下褶皱位置对开孔压缩强度的影响,并对各种不同情况下试样的破坏模式进行了分析。

(1) 本研究提出了用褶皱的宽高比来衡量复合材料褶皱的状态。当预制体褶皱的中心位于试验件中心时,试件的开孔压缩强度最低,下降了约21%~24%;

(2) 当固定褶皱的高度 h ,增加褶皱的宽度 l ,试件的开孔压缩强度随褶皱宽度的增加而提高;

(3) 当固定褶皱的宽度 l ,增加褶皱的宽度 h 时,随着褶皱高度的升高,褶皱的坡度增加,开孔压缩强度随之降低。

参考文献

[1] Fish J, LeMonds J, Shek K L. Modeling and simulation of wrinkling in compression molding process of fiber reinforced composites. Rensselaer Polytechnic Institute, General Electric Company.
 [2] Guillaume S. Finite element-based failure models for carbon/epoxy tape composites. Georgia Institute of Technology, 2009:1-73.
 [3] Cloude B, Kevin O S, Scott S. Process for reducing wrinkles in composite laminated structure. United State Patent, US8.206.526 B2, Jun 26, 2012.
 [4] Chris A. Evaluation the effects of wrinkle bends[EB/OL]. www.Pipelineandgas technology.2009[2014-5].
 [5] 刘强,赵龙,曹正华.VARI工艺成型纤维增强树脂复合材料层板厚度和纤维体积分数的影响因素.复合材料学报,2013,30(6):90-95. (责编 杰一)