

碳/ KH—304 复合材料构件开口补强技术研究

赵伟栋 李卫芳

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 针对碳/ KH—304 复合材料构件的开口补强技术进行了研究。采用了平板轴压稳定性试验方法,对边框形补强件、开口未补强件及未开口平板试件的抗压性能进行了比较。结果表明,环向铺层可以提高补强效果;补强区选择模量低的材料有利于提高构件的承载能力;缝纫工艺的引入减少了孔边的剥离应力,也可以明显提高构件的承载能力;二次胶接的研究使构件的制作简单化。

关键词 碳/ KH—304 复合材料,开口补强

Open-hole Strengthening for Graphite/ KH-304 Composite Structure

Zhao Weidong Li Weifang

(Aerospace Research Institute of Material and Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Open-hole strengthening techniques for graphite/ KH-304 composite structural component are investigated. Axial compression stability test is selected for plates with circular open-hole, and strengthened open-hole as well as no open-hole. Experimental results show that circular layer and using materials with relative low modulus can promote strengthening effect, and sewing technique may reduce peeling stress, along hole edge and increase structural component's carrying capacity, and second bonding may simplify the strengthening process for composite structural components.

Key words Graphite/ KH-304 composite, Open-hole strengthening

1 前言

碳/ KH—304 复合材料构件开口补强工艺研究是碳/ KH—304 复合材料工艺研究的一个组成部分。在复合材料结构上进行开口,就必须进行补强;这是因为,开口使复合材料铺层中的某些纤维被切断,同时形成孔边的高应力区,而复合材料板的各向异性又使得承载时孔边区域由于边缘效应而产生剥离应力,这些都会削弱结构的静强度和疲劳强度。构件上的开口分复杂应力状态下的开口,如蒙皮壁板上的开口,简单应力状态下的开口,如腹板上的开口等等。

复合材料的强度问题同材料的微观构造和局部因素有着密切的关系,复合材料结构上的开口与金

属材料开口相比,有以下特点^[1,2]:(1)复合材料从初始加载直到破坏,无明显的塑性阶段,所以开口区的强度削弱比较严重;(2)在复合材料结构的开口边缘存在边界效应;(3)复合材料结构的开口影响区比金属结构相应的开口影响区大;(4)复合材料多向叠层板的层间剪切强度和刚度比较低,因此开口不易补强,且补强的范围应比金属结构的大。根据碳/ KH—304 复合材料构件的特点及试验方法的可靠性,本研究选择了圆孔的开口形式,采用了平板轴压稳定性试验方法,对边框形补强件、开口未补强件及未开口平板试件的抗压性能进行了比较。

2 试验

2.1 试件的制作

收稿日期:2002-06-12;修回日期:2002-12-20

赵伟栋,1967年出生,硕士,主要从事树脂基复合材料的研究工作

(1) 原材料

碳纤维: T300—3K—40B。

树脂: KH—304 聚酰亚胺。

预浸料: T300/ KH—304 预浸料, 树脂的质量分数为 38%~42%, 单位面积纤维质量为 133 g/mm²~135 g/mm², 固化后单层厚度为 0.125 mm。

碳布: 平纹, 厚度 0.15 mm。

玻璃布: 平纹, 厚度 0.2 mm。

(2) 开口方式

根据碳/ KH—304 复合材料构件的特点及试验方法的可靠性, 本研究选择了圆孔的开口形式。

(3) 补强方式

采用体积补强方法确定材料的用量, 即: 补强材料约为开口所去的材料的 1.4~1.6 倍^[2]。

(4) 试件尺寸

根据文献[3,4]报道, 开口补强的设计要素有 d/w 、 t_s/t 、 D/d (含义见图 1)、铺层及材料的选择。

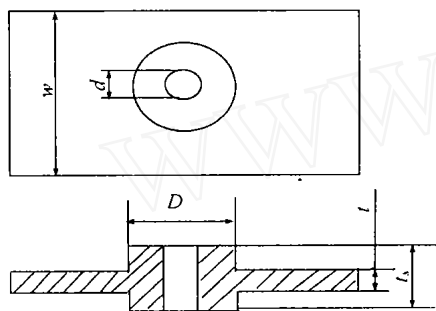


图 1 参数示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the parameters

为便于比较, 本研究选择的试件尺寸对所有平板的 d/w 、 t_s/t 、 D/d 等参数而言均一致, 仅研究铺层、材料和工艺等对补强效果的影响。

面板: 240 mm × 160 mm × 2 mm。

开口直径: 75 mm。

开口补强区的直径: 75 mm × 100 mm。

(5) 铺层方式

分别选用了碳布和玻璃布作为试验材料。

面板铺层: +45° - 45° 0°/90° 0°/90° 0°/ - 45° + 45°

补强区的铺层: 布/90° + 45° - 45° 0°/90° 0°/90° 0°/ - 45° + 45°

2.2 制作工艺^[5]

宇航材料工艺 2003 年 第 1 期

(1) 工艺方法

按 T300/ KH304 预浸料制作方法制备无纬布, 将无纬布进行裁剪、铺层, 然后放在压机上固化成型。试件成型的固化工艺分三步进行: 亚胺化过程 (150 / 1 h); 固化过程 (320 / 2 h); 后处理过程 (320 / 8 h)。模具示意图见图 2, 成型出的试件示意图见图 3。

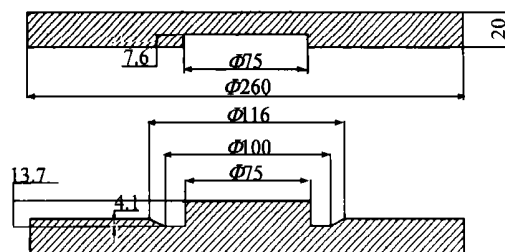


图 2 模具示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the mould

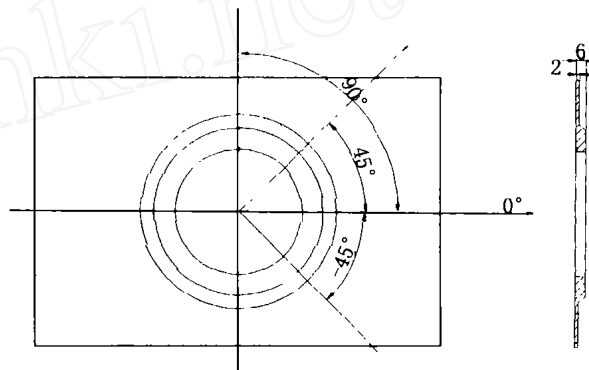


图 3 开孔试样示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the open-hole sample

图 3 中的方向表示纤维铺层的方向, 试样经超声波无损检测后, 选择缺陷面积小于 2% 的样品以备测试使用。

2.3 压缩稳定性试验

(1) 试样夹具及装夹方式

试样夹具: 自制。

装夹方式: 沿加载方向试样横截面的左右两侧为铰链约束, 沿加载方向试样正面为固定约束, 侧面为铰链约束。

(2) 试验方式

试验方式为压缩, 逐级加载, 载荷间隔 1 kN, 直至试样破坏或载荷明显下降。在加载级别点测量各点应变和法向位移。试验速度 0.5 mm/min ~ 1.0

mm/min。

3 结果及讨论

3.1 铺层形式对开孔补强的影响

不同的受力方式,采用的补强铺层形式不尽相同。本研究主要根据试件承受轴向压缩载荷的情况,进行了90°与环向铺层的比较(其他铺层不变),90°铺层方式是按以下方式进行的:布/90°+45°-45°/0°/90°/0°/90°/0°-45°+45°;环向铺层方式则是将上述的90°铺层改用于连续的长纤维沿开孔的圆周方向缠绕在补强区的一种方式。试验结果见表1,由于试验是分两次进行的,为便于比较,用补强板与未补强的开孔板的压缩稳定性载荷的比值来说明铺层形式对开孔补强的影响。

表1 铺层形式对压缩稳定性载荷比值的影响

Tab.1 Comparison of different lay-up configurations on the ratio of axial compression stability load

铺层形式	压缩稳定性载荷/kN		比值 (补强/未补强)
	开孔未补强	开孔补强	
环向	16.4	18.8	1.15
90°	14.66	14.75	1.01

由表1可以看出,环向铺层比90°铺层补强效果更明显一些。对于复合材料叠层板中开孔的情形,沿开孔的部位纤维被切断,试件中的压应力不能被有效传递到未切断的部分。试件承受轴向压缩载荷的情况下,这时轴向为纤维方向。这可能是因为90°铺层在受轴压时起不到更主要的作用;而环向铺层沿孔周围是连续的,在应力的传递效果上较之90°铺层有明显的提高;与此同时,在补强区的应力分布可能会更均匀些,也就是说降低应力集中,因而相比之下环向铺层方式的补强效果就更明显些。

3.2 铺层材料对开孔补强的影响

试验中分别选用了两种铺层材料:碳布和玻璃布(其他铺层不变)。试验结果见表2。

表2 铺层材料对开口补强的影响

Tab.2 Effects of Materials on open-hole strengthening

铺层材料	压缩稳定性载荷/kN
碳布	22.03
玻璃布	30.46

试验结果显示韧性好的玻璃纤维的加入可以

改善补强的效果。开口使复合材料铺层中的某些纤维被切断,同时由于各向异性的影响,出现了比均匀各向同性材料更严重的应力集中问题,形成不均匀应力场,且在孔周边的小范围内应力升高形成高应力区。当载荷增加时,就要出现界面脱粘、基体开裂、层间开裂和纤维断裂等损伤。当损伤还比较小时,应力场就要调整 and 变化,在有损伤的部位,由于刚度减小应力也随之减小,在还没有损伤的部位,相对来说,刚度较大所受的应力就会增加,若采用一部分高延伸率的纤维以取代低延伸率的纤维,则可以降低应力,减小应力集中系数,减小损伤区和阻止、延缓裂纹尖端的进一步扩展,从而提高了承载能力。

3.3 孔边加缝纫对开孔补强的影响

孔边加缝纫对开孔补强影响的试验结果见表3。

表3 缝纫和二次胶接对开口补强的影响

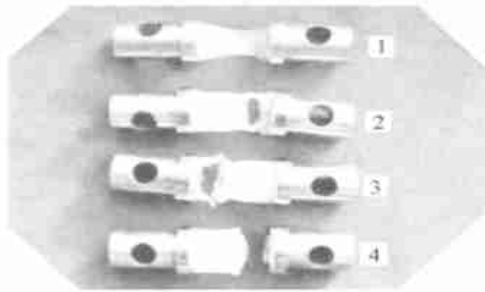
Tab.3 Effects of sewing and second bonding on open-hole strengthening

补强方式	试样状态	压缩稳定性 载荷/kN	比值 (补强与未补强)
铺层(碳布)	开孔补强	22.03	1.50
铺层(玻璃布)	开孔补强	30.46	2.08
缝纫(碳布)	开孔补强	29.72	2.03
二次胶接(碳布)	开孔补强	21.68	1.48
开孔板	开孔未补强	14.66	-

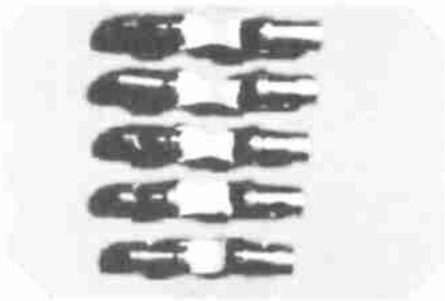
由于复合材料板的各向异性,承载时孔边区域在层间的自由边界上会发生层间应力急剧升高的现象,实质上也是一种应力集中现象。层间应力使叠层复合材料中各个方向的铺层在面内产生协同作用^[2]。当层间应力超过材料的层间强度时,就要发生层间破坏;为此,要采取相应的措施来提高材料的层间强度。试验中采取了沿开孔周围在厚度方向加缝纫的补强措施,由表3的结果可以看出,层间加缝纫不失为一种好的措施,对照表3中的压缩稳定性载荷值(22.03 kN和29.72 kN),可以看出补强区的层间是一薄弱环节,这可能是由于层间应力集中的程度比较严重所导致,所以层间补强显得较为重要。

3.4 二次胶接对开孔补强的影响

(下转第52页)



(a) 挖槽角度为 15°



(b) 挖槽角度为 25°

图 10 滚边收口试样拉伸试验后的照片

Fig. 10 Edge-rolled joints after tension

由表 2 可知,滚边收口后 FEP 和金属的粘接强度变化不大。控制不同滚边工艺参数,模拟试样的粘接强度基本相同。

比较图 9、图 10(a)、图 10(b)可知,模拟试验件

的破坏形式明显不同。由图 9 可以看出,试样 FEP 部分未发生明显变形,沟槽中的 FEP 完全从槽中脱出;从图 10(a)、图 10(b)可以看出,经过拉伸试验后,试验件 FEP 部分产生明显的屈服形变,有的甚至被拉断,金属沟槽中的 FEP 很难从槽中脱出,从而显著提高了 FEP 和金属骨架的连接可靠性。

4 结论

(1) FEP 和金属不锈钢的粘接强度值达到 18.9 MPa,过渡层对粘接强度的贡献很大。

(2) 选择合适的工艺参数,进行滚边收口加工,不影响 FEP 和金属不锈钢的粘接强度,但滚边收口加工可以完善 FEP 和金属不锈钢沟槽的连接结构,有效地防止 FEP 从金属骨架的沟槽中脱出,提高塑料金属密封件的使用可靠性。

参考文献

- 1 阀门管件设计编译组编译. 美国阀门管件设计手册. 北京:机械工业出版社,1987:319
- 2 金国珍. 工程塑料. 北京:化学工业出版社,2000:463
- 3 缪京媛,叶牧编. 氟塑料加工与应用. 北京:化学工业出版社,1987:10
- 4 巫金东. 氟塑料的性能及其在液氧密封中的应用. 低温工程,1981;(4):17~21
- 5 翟海潮等. 粘接与表面粘涂技术. 北京:化学工业出版社,1993:12

(编辑 马晓艳)

(上接第 42 页)

在复合材料构件结构复杂时,补强部分与壳体若共固化成型,模具要求严格,且形式太复杂,操作困难;为此,我们将补强部分与开孔板分别成型,然后采用二次胶接。二次胶接也有一定的补强效果(表 3)。

4 结论

(1) 铺层材料、铺层方式、铺层工艺等是影响开孔补强效果的主要因素。

(2) 压缩稳定性试验中,环向铺层可以提高补强效果。

(3) 补强区选择模量低的材料有利于提高构件的承载能力。

(4) 缝纫工艺的引入减少了孔边的剥离应力,亦提高了构件的承载能力。

(5) 二次胶接的工艺简单,也有一定的补强效果。

参考文献

- 1 薛克兴. 复合材料结构的损伤与修补. 北京:航空工业出版社,1992:106~119
- 2 王震鸣. 复合材料力学和复合材料结构力学. 北京:机械工业出版社,1991:459
- 3 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,1990:187~198
- 4 杜善义,沃丁柱. 复合材料及其结构的力学、设计、应用和评价(第三册). 哈尔滨工业大学出版社,2000:125~132
- 5 丁孟贤,何天白. 聚酰亚胺新型材料. 科学出版社,1998:63~69

(编辑 任涛)