

飞行器承力结构件材料与结构研究

张海燕 李根臣 刘震宇 刘晓飞 王义师 邵 蒙 郑志才 魏化震

(山东非金属材料研究所, 济南 250031)

摘 要 采用纤维增强环氧树脂复合材料固化成型制得实心承力结构件和空心承力结构件。对承力结构件的应变、质量以及外观方面进行了探究。制得的实心承力结构件和抽芯中空承力结构件外观良好, 表面光滑, 没有麻点、裂纹等缺陷; 而轻木夹芯承力结构件和泡沫夹芯承力结构件工艺性差, 结构件表面出现不同程度的麻点, 有凹坑、缺料等现象。抽芯空心承力结构件的应变、质量分别为 0.72mm、208g, 比实心承力结构件的应变增加了 22.03%, 质量减少了 21.51%, 但是抽芯空心承力结构件的内部品质仍需进行深入的研究。

关键词 承力结构件, 碳纤维, 实心结构, 夹芯结构, 中空结构, 应变

Research on the material and property of aircraft's bearing structure

Zhang Haiyan Li Genchen Liu Zhenyu Liu Xiaofei Wang Yishi Shao Meng

Zheng Zhicai Wei Huazhen

(Shandong Nonmetal Material Research Institute, Jinan 250031)

Abstract Fiber reinforced epoxy resin composite was used to solidify the solid and hollow bearing structure. The deformation, weight and appearance of load-bearing structure were studied. The solid and the hollow bearing structure had great appearance, smooth surface, and no defects such as hemp points and cracks. Meanwhile, the structure of light wood sandwich and the foam sandwich structure had poor craftsmanship, and there were some hemp spots on the surface, such as pits and lack of materials. The deformation and weight of hollow bearing structure were 0.72mm and 208g, respectively. Compared to the solid bearing structure, the deformation of hollow one increased by 22.03% and decreased by 21.51%. However, the internal quality of hollow bearing structure still needed to be further studied.

Key words bearing structure, carbon fiber, solid structure, sandwich structure, hollow structure, deformation

随着现代科技的迅猛发展, 必将为航空航天飞行器如飞机、弹箭武器的发展开辟新的途径。现代飞行器向机动化、隐形化、智能化和微电子化的更高层次发展。为了适应这种形势的发展, 需要对相关的主承力结构部件不断改进, 如优化结构, 或采用更先进的材料^[1]。材料决定了结构件的性能。随着材料的发展, 碳纤维复合材料已应用于无人机、直升机主结构、次结构件和特殊部位的特种功能部件。国外将环氧树脂/碳纤维和双马来酞亚胺/碳纤维复合材料应用在战斗机和直升机的机身、主翼、垂直尾翼、水平尾翼及蒙皮等部位, 起到了明显的减重作用, 大大提高了抗疲劳、耐腐蚀等性能。在民用航空领域, 飞机机体结构中大量使用碳纤维复合材料, 这些部件包括减速板、垂直和水平稳定器、襟翼扰流板、起落架舱门、整流罩、垂直尾翼盒、方向舵、升降舵、上层客舱地板梁、后密封隔框、后压力舱、后机

身、水平尾翼和副翼等^[2-3]。

碳纤维复合材料在航天领域也发挥着不可替代的作用。高模量碳纤维质轻、刚性、尺寸稳定性和导热性好, 因此很早就应用于人造卫星结构体、太阳能电池板、天线、导弹弹头、弹体箭体和发动机壳体的结构部件上。最初承力结构件使用较重的钢材, 现普遍采用涂覆各种耐烧蚀保护涂层的铝合金或钛合金, 正在发展轻质树脂基复合材料。与金属制件相比, 轻质复合材料制件具有质量轻、易成型、比强度和比刚度高、耐疲劳、可设计性强和批产效率高等优点^[4-6]。采用轻质复合材料可以整体成型制件, 这样显著减少了制件所含零件/紧固件、铆、焊结构, 表面光滑规整, 而且可以减轻质量 30%~60%, 增加飞行器行程、载荷和机动性能以及降低成本。因而, 无论质量还是刚强度方面, 铝合金制件都无法与轻质复合材料制件相媲美。

轻质复合材料主要有树脂基体^[7-8],包括环氧树脂、酚醛树脂和聚酰亚胺等,其中聚酰亚胺具有优异的热氧化稳定性以及良好的综合力学性能,可在高温环境中长期使用,在航空、航天工业领域的应用必不可少,但它本身也存在工艺性差、预浸料质量控制困难以及价格昂贵等缺点,有待于进一步研究开发。环氧树脂力学性能要优于改性酚醛,因此选取合适的承力结构件材料,对提升飞行器的性能指标具有重要的意义。本研究将重点开展以环氧树脂为基体的复合材料承力结构件的结构与内部品质的研究。

1 实验部分

1.1 材料

进口碳布(T300-6K),日本东丽公司;国产碳布(TW-1型),威海拓展纤维有限公司;进口碳纤维(T700-12K),日本东丽公司;国产碳纤维(TQW-1),威海拓展纤维有限公司;环氧树脂体系,实验室自制。

1.2 设备

预浸机(CD6015型),美国CDI公司;裁割机(DSC2500型),格柏科技有限公司;液压机(YQ32-160T型),滕州市密友机械有限公司;液压万能试验机(WAW-600D型),山东建力检测技术有限公司;电子天平(JY203型),上海浦春计量仪器有限公司;超声波C扫描成像检测系统(BSN-C3409型),北京北辰星辰科技有限公司。

1.3 样品的制备

1.3.1 预浸料的制备

称取环氧树脂体系与碳布,以热熔法为制备工艺,采用预浸机(CD6015型,美国CDI公司)复合制成环氧树脂/碳布预浸料,将环氧树脂体系与碳纤维复合,制得环氧树脂/碳纤维预浸料^[8],采用裁割机(DSC2500型,格柏科技有限公司)将环氧树脂/碳布预浸料和环氧树脂/碳纤维预浸料裁剪成直角梯形样片,样片的上底、下底和高分别为200mm、400mm和100mm,裁好后备用。

1.3.2 实心承力结构件的制备

采用环氧树脂、进口碳布(T300-6K)预浸料,以11层样片逐层铺放,得到预成型坯料,放入模具,采用液压机(YQ32-160T型,滕州市密友机械有限公司)热压成型,即制得进口碳布结构件^[9-11]。称取环氧树脂、国产碳布预浸料,采用上述同样的方法,即制得国产碳布结构件。

预成型坯料的上下表面采用碳布预浸料,坯料

内部9层材料全部使用0度方向碳纤维预浸料,逐层铺放,并经过热压,即制得应用材料分别为国产碳布/国产碳纤维、国产碳布/进口碳纤维、进口碳布/国产碳纤维和进口碳布/进口碳纤维结构件的4种实心承力结构件。

1.3.3 中空承力结构件的制备

称取预成型坯料共11层样片,其中第1层和第11层采用碳布预浸料,第2、3、4、8、9、10层采用0度方向碳纤维预浸料,第5、6、7层采用同样尺寸的轻木材料填充,逐层铺放,放入模具,采用液压机(YQ32-160T型,滕州市密友机械有限公司)热压成型,即制得轻木夹芯承力结构件。将轻木材料替换为发泡材料,并采用同样的方法成型,即制得发泡夹芯承力结构件。将轻木材料替换为刚性模,采用同样的方法成型,即制得抽芯空心承力结构件。采用上述工艺共制得中空承力结构件的轻木夹芯承力结构件、发泡夹芯承力结构件和抽芯空心承力结构件3类7个样品。

1.4 样品的测试

采用电子天平(JY203型,上海浦春计量仪器有限公司)对样品进行称重。采用目测检测结构件样品的外观形貌。采用液压万能试验机(WAW-600D型,山东建力检测技术有限公司)对样品的力学性能进行测试。采用超声C扫描成像检测系统(BSN-C3409型,北京北辰星辰科技有限公司)对样品的内部结构品质进行测试。

2 结果与讨论

2.1 实心承力结构件性能分析

本研究采用环氧树脂为预浸料制得的实心承力结构件平面形状为梯形,剖面为矩形,对不同材料成型出的结构件进行外观、质量及力学性能进行分析对比。实心承力结构件与铝合金承力结构件的性能比较见表1。从表1可知,碳纤维增强环氧树脂复合材料结构件的质量、拉伸强度、拉伸模量、短时耐温分别为265g、1800MPa、120GPa、260℃,与相同形状的铝合金构件的质量、拉伸强度、拉伸模量、短时耐温分别为450g、425MPa、68GPa、250℃相比,质量减少了41.11%,拉伸强度、拉伸模量、短时耐温分别增长了328.53%、76.47%、0.04%,研究结果表明,铝合金构件无论在质量以及刚强度方面都无法与制得的实心承力结构件相媲美,对耐温要求不高的实心承力结构件^[12]而言,碳纤维增强环氧树脂复合材料是制作结构件的理想材料。

表 1 实心承力结构件与铝合金承力结构件的性能比较

材料	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	质量/ g	拉伸强 度/MPa	拉伸模 量/GPa	弯曲强 度/MPa	短时耐 温/ $^{\circ}\text{C}$
环氧树脂	1.6	265	1800	120	2000	260
铝合金	2.7	450	425	68	—	250

实心承力结构件的应变量和质量见表 2。从表 2 可知,由碳纤维增强环氧树脂复合材料成型的结构件的应变量均达到了使用要求,其中国产碳布结构件应变量为 0.90mm,进口碳布结构件^[13]应变量为 0.71mm,因而国产碳布结构件的应变量要比进口碳布大,说明国产碳布品质水平与国外产品特别是日本东丽产品还有一定差距,性能方面还有待进一步提高。

表 2 实心承力结构件的应变量和质量

样品编号	材料	应变量/mm	质量/g
1	国产碳布	0.90	265
2	进口碳布	0.71	265
3	国产碳布/国产碳纤维	0.59	265
4	国产碳布/进口碳纤维	0.58	265
5	进口碳布/国产碳纤维	0.45	265
6	进口碳布/进口碳纤维	0.35	265

采用碳纤维增强环氧树脂预浸料预成型结构件工艺过程中,结构件坯料的上下表面采用碳布预浸料,坯料的内部材料全部使用单向碳纤维预浸料,而且预浸料尽量采用对称均衡的铺层原则,并选用 $[0^{\circ},90^{\circ}]$ 铺层方向。从表 2 可知,采用该铺层工艺制得的国产碳布/国产碳纤维结构件(样品 3)、国产碳布+进口碳纤维结构件(样品 4)、进口碳布/国产碳纤维结构件(样品 5)和进口碳布/进口碳纤维结构件(样品 6)的应变量分别为 0.59mm、0.58mm、0.45mm、0.35mm^[14],由此可知,国产与进口碳纤维承力结构件应变量相差不大,没有较大区别,表明国产碳纤维在性能方面已经接近进口碳纤维的水平。

2.2 空心承力结构件性能分析

进一步研究了在不影响性能的基础上结构件减重的课题,提出了将结构件^[15-16]设计为夹芯承力结构件,分别采用轻木与发泡材料来代替一部分碳纤维预浸料,使承力结构件呈夹芯结构,分别制得轻木夹芯承力结构件、发泡夹芯承力结构件以及抽芯中空承力结构件 3 种结构件,对 3 种结构件从外观形

貌、应变量及质量三方面进行对比研究。空心承力结构件性能见表 3。从表 3 可知,抽芯空心承力结构件(见样品 11)的应变量、质量分别为 0.72mm、208g,比实心承力结构件(见样品 3)的应变量为 0.59mm、质量为 265g,应变量增加了 22.03%,质量减少了 21.51%,由于轻木夹芯承力结构件和发泡夹芯承力结构件的成型工艺性较差,导致外观有麻点、凹坑以及缺料现象,而抽芯空心承力结构件为刚性芯模,不需要考虑树脂损失的因素,工艺易于控制,成型的承力结构件不仅表面光洁,且质量减轻显著,因此抽芯空心承力结构件具有较好的性能。

表 3 空心承力结构件的性能

样品编号	结构	应变量/mm	质量/g	外观
7	轻木夹芯	0.67	222	表面有麻点,缺料
8		0.63	229	表面良好
9	发泡夹芯	0.80	228	表面有麻点,凹坑
10		0.69	234	表面良好
11	抽芯空心	0.72	208	表面良好
12		0.63	220	表面良好
13		0.70	218	表面良好

2.3 承力结构件内部品质分析

承力结构件超声 C 扫描图见图 1。从图 1(a)可以看出,实心承力结构件内部均一,没有气孔以及分层现象,说明该结构件的制作工艺良好。从图 1(b)可以看出,轻木夹芯承力结构件的轻木在加压过程

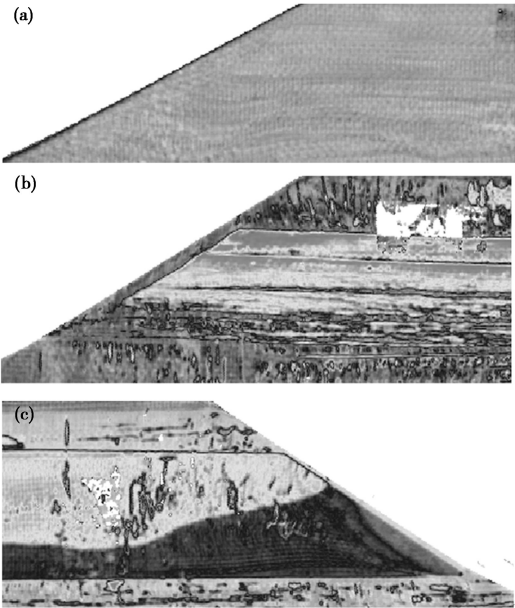


图 1 不同承力结构件超声 C 扫描图
[(a)实心承力结构件;(b)轻木夹芯承力结构件;
(c)抽芯承力结构件]

中有一定的偏移,造成内部结构不均匀。从图 1(c)可以看出,抽芯承力结构件的内部结构也呈不均匀现象,轻木夹芯承力结构件和抽芯承力结构件的内部结构的品质都需要进一步提高,造成的原因主要有,首先,结构件呈中空结构,壁厚太薄,仅 1mm 左右;第二,刚性模在入模之前需要涂抹一些脱模剂以及包裹隔离膜,这样结构件出模后会在中空壁上残留脱模剂和隔离膜;第三,在压型过程中有气孔出现。

3 结论

采用纤维增强环氧树脂复合材料固化制得实心承力结构件、轻木夹芯承力结构件、发泡夹芯承力结构件和抽芯中空承力结构件。对耐热要求不高的承力结构件的基体材料宜选用环氧树脂。实心承力结构件和抽芯中空承力结构件外观良好,表面光滑,没有麻点、裂纹等缺陷;而轻木夹芯承力结构件和泡沫夹芯承力结构件工艺性差,结构件表面出现不同程度的麻点,有凹坑、缺料等现象。抽芯空心承力结构件的应变量、质量分别为 0.72mm、208g,比实心承力结构件的应变量增加了 22.03%,质量减少了 21.51%,抽芯中空承力结构件在质量和外观方面具有很大的优势,但是内部结构仍需进行深入的研究。

参考文献

- [1] 樊会涛,吕长起,林忠贤,等.空空导弹系统总体设计[M].北京:国防工业出版社,2007,12-106.
- [2] 肖军,张鹏.轻质复合材料舵翼面的材料设计[J].航空兵器,

2008(5):57-61.

- [3] 刘献伟,张鹏,姚利兵,等.空空导弹舵翼面的技术发展[J].航空兵器,2010(1):12-15.
- [4] 沃丁柱.复合材料大全[M].北京:化学工业出版社,2000,12-225.
- [5] 王耀先.复合材料力学与结构设计[M].上海:华东理工大学出版社,2012,16-98.
- [6] 张玉龙.高技术复合材料制备手册[M].北京:国防工业出版社,2003,12-106.
- [7] 益小苏,杜善义,张立同,等.中国材料工程大典(第 10 卷),复合材料工程[M].北京:化学工业出版社,2006:790-826.
- [8] CMH-17 协调委员会.复合材料手册(第 6 卷),复合材料夹层结构[M].上海:上海交通大学出版社,2016,23-169.
- [9] 沈真.复合材料结构设计手册[M].北京:航空工业出版社,2001,12-98.
- [10] 田军良.全动复合材料水平尾翼承力结构件主承力壁板热压罐成型工艺[J].航空制造技术,2005(9):92-94.
- [11] 沃西源,薛芳,李静.复合材料模压成型的工艺特性和影响因素分析[J].高科技纤维与应用,2009,34(6):41-44.
- [12] 乌云其格.模压成型工艺对复合材料性能影响[J].玻璃钢/复合材料,2001(6):40-41.
- [13] 张玲,张世武,孟建新.模压成型工艺对复合材料性能影响[J].航空兵器,2012(3):8-10.
- [14] Wang Wei, Yang Wei, Chang Nan. Integration shape and sizing optimization of composite wing structure based on response surface method[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 25(2): 94-100.
- [15] 赵群.复合材料翼面结构布局优化设计方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2010.
- [16] Degenhardt R, Kling A, Rohwer K, et al. Design and analysis of stiffened composite panels including post-buckling and collapse[J]. Computers & Structures, 2008, 86: 919-929.

收稿日期:2018-01-04

修稿日期:2019-02-23

(上接第 122 页)

参考文献

- [1] 王晓川,舒远杰,卢先明,等.1,3-偶极环加成反应在固化含能黏合剂中的应用[J].化学推进剂与高分子材料,2017,15(4):32-37.
- [2] Grundmann C, Judith M D. Stable aromatic nitrile oxides[J]. Angewandte Chemie International Edition, 1964, 3(8): 585-586.
- [3] Kotel'nikov S A, Sukhinin V S, Eemilov A S. Kinetics of formation and curing of oligoether urethane allyl ester[J]. Russian Journal of Applied Chemistry, 2002, 75(3): 477-479.
- [4] Feuer H. Nitrile oxides, nitrones, and nitronates in organic synthesis[M]. Hoboken: A John Wiley & Sons, Inc., 2008: 1-5.
- [5] Yakubov A P, Tsyganov D V, Belenkii L I, et al. Synthesis of

stable functionally substituted nitrile oxides of the aromatic series[J]. Russian Chemical Bulletin, 1991, 40(5): 1078-1080.

- [6] Grundmann C, Grünanger P. The nitrile oxides[M]. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 1971: 58-61.
- [7] Kumar A, Govindaraju M, Jayaroopa P, et al. Nitrile oxides: a key intermediate in organic synthesis[J]. International Journal of Pharmaceutical Chemical and Biological Sciences, 2012, 3(1): 91-101.
- [8] Huffman B, Schultz R, Schlom P. Novel reagents for heat-activated polymer crosslinking[J]. Polymer Bulletin, 2001, 47(2): 159-160.
- [9] 齐晓飞,付小龙,刘萌.固体推进剂用黏合剂的改性研究进展[J].化工新材料,2015,43(1):1-5.
- [10] 樊亚勤,向尧,雷永林,等.对苯二腈氧化物的合成及其室温固化性能[J].精细化工,2017,34(9):1063-1069.

收稿日期:2017-12-13

修稿日期:2019-01-09