

袋压法成型复合材料在小型无人机机体结构中的应用

张元明 赵鹏飞 何 颖 赵景丽

(西北工业大学第365研究所,西安 710072)

摘要 介绍袋压法成型复合材料在小型无人机机体结构中的应用情况。详述了小型无人机机体结构用复合材料原材料的性能与选择依据,以及复合材料结构件的力学性能,并简要介绍袋压法成型的小型无人机机体复合材料结构件的成型工艺特点。

关键词 无人机 复合材料 袋压法成型 工艺 性能

复合材料具有高比强度、高比模量、良好的抗疲劳特性、独特的材料及结构可设计性等优良特性,可显著地提高飞机的结构效率和使用寿命,减轻质量,改善气动力性能,因而在航空飞行器上获得了日益广泛的应用^[1]。

由于湿法接触手糊成型和袋压法成型工艺简便、成本较低、制造周期短和易于整体成型大型复杂结构件,所以小型无人机的玻璃钢及其蜂窝夹层机体结构部件较多地采用这两种工艺方法成型,并且这类复合材料结构件使得飞机部件装配时可方便地采用以胶接为主的连接形式,因而装配过程较为简单。

1 复合材料在小型无人机中的应用

无人机基本上是在中低空飞行高度以低速或亚音速飞行速度飞行,小型无人机的飞行高度和飞行速度更是有限的。

由于小型无人机机体采用复合材料的结构形式、成型工艺方法及使用要求具有多样性,因而复合材料及其原材料的选择范围也是相当广泛的。长期以来,为了减小飞机结构质量系数,并且随着复合材料性能的不断提高及成型工艺方法的持续改进与发展,国内外研制与生产的众多型号小型无人机的机体结构以采用树脂基复合材料为主,复合材料在飞机结构件中的使用达到很高的比例,不但外部构件采用复合材料制造,而且机体结构中的主承力结构件也正在愈来愈多地使用复合材料。事实上,大部分小型无人机可称得上全复合材料飞机了^[2]。

从小型无人机机体结构应用复合材料的情况看,机体结构蒙皮常采用蜂窝夹层结构、泡沫塑料夹层结构形式,而结构中的主承力结构件(如机翼梁、机身梁及后推式布局飞机所使用的管状尾撑杆等)则通常采用叠层板或缠绕的结构形式。从复合材料的成型工艺看,接触低压成型工艺占据主导地位,其

中袋压法成型和热压罐法成型这两种方法是最为常用的。其它像尾撑杆类管状零件一般采用缠绕成型加工,而用于飞机与发动机整流的复合材料结构件较多采用手糊成型或树脂传递模塑(RTM)和真空成型的方法制造。另外,一些梁类的结构件也有采用模压工艺制造的。

2 材料性能与选择依据

小型低速无人机一般要求复合材料的使用温度为60~80℃。虽然该使用温度并不高,但对于适用于湿法手糊成型玻璃钢和袋压法成型玻璃钢蜂窝夹层结构的常温固化树脂基体而言,要使玻璃钢的热变形温度达到这一耐热性要求还是十分困难的,因而湿法手糊成型或袋压法成型玻璃钢及其蜂窝夹层结构通常只适用于飞机外形结构等非主承力结构件的制造。

在复合材料性能满足设计和使用要求的前提下,对增强材料和树脂基体等的选择需要从成型工艺方法、密度、成本、材料来源、质量控制及某些特殊要求方面进行综合考虑与评价。笔者结合实际应用情况着重介绍袋压法成型小型无人机机体结构件常用的一些基本材料及其性能。

袋压法成型是通过压力袋或真空袋对手糊成型的未固化制品施加压力,使制品或半成品在压力下固化成型的方法。一些型号的小型无人机机体结构蒙皮所用的蜂窝夹层结构、泡沫塑料夹层结构采用了该工艺方法制造^[3~5]。由于小型无人机机体复合材料结构设计形式较为复杂,机体外形又呈曲面,而且航空制品对材料的性能和质量要求较高,所以在进行材料选择时需充分考虑这些特点。

2.1 增强材料

虽然纤维增强材料的品种很多,但在小型无人

机机体结构上应用较多的是比强度高的玻璃纤维织物、碳纤维与碳纤维布, 并且以厚度小的薄型纤维布为主。这类纤维织物适于制造面板较薄的夹层结构复合材料。

小型无人机机体用复合材料的制造仍以玻璃纤维布为主, 以便合理地控制成本。但提高飞机性能和实现无人机轻量化的需要已经使得碳纤维及其织物的使用量逐步增加。具体选择增强材料时, 在材料性能满足要求的前提下, 应充分发挥复合材料的可设计性, 以获得优异的性价比。

(1) 玻璃纤维与制品

由无碱玻璃纤维(E-玻璃纤维)和高强玻璃纤维(S-玻璃纤维)分别制成的玻璃纤维布是小型无人机机体结构件主要的增强材料。

E-玻璃纤维的力学强度比中碱玻璃纤维高10%~20%, 而S-玻璃纤维更是具有高强度、高模量的特点, 比E-玻璃纤维的拉伸强度高25%左右, 并且拉伸弹性模量也有较大提高。不过其价格比E-玻璃纤维要高5~12倍^[1]。E-玻璃纤维、S-玻璃纤维及碳纤维的基本性能见表1^[6,7]。

表 1 玻璃纤维和碳纤维的基本性能

项 目	玻璃纤维		碳纤维		
	E-玻璃纤维	S-玻璃纤维	T300	T300J	T700S
单纤维拉伸强度/GPa	2.19	2.80	3.53	4.21	4.90
拉伸弹性模量/GPa	75	86	230	230	230
断裂伸长率/%	3.37	4.6	1.5	1.8	2.1
密度/g·cm ⁻³	2.54	2.49	1.76	1.78	1.80
比强度/10 ⁶ m ² ·s ⁻²	8.6	11.2	20.1	23.6	27.2
比模量/10 ⁶ m ² ·s ⁻²	2.2	3.5	13.1	12.9	12.8

事实上, 玻璃纤维布的性能不但与纤维种类、原丝号数×股数、单纤维公称直径及纱密度有关, 而且还不同程度地受布的编织结构的影响。就强度而言, 缎纹布高于斜纹布, 斜纹布高于平纹布。表2列出了一些主要玻璃纤维布的性能指标。从表2可以看出, 分别由E-玻璃纤维和S-玻璃纤维编织的相同厚度、相同编织结构的EW100A和SW100A的拉伸断裂强力分别为500 N和550 N, 相差仅10%, 显然与表1中给出的两种纤维的拉伸强度之差幅度不同, 所以在选择玻璃纤维布时应以具体玻璃纤维布的性能数据为准, 并且飞机结构设计时也会针对不同部件或不同部位选用不同的玻璃纤维布。虽然E-玻璃纤维布的用量大, 生产厂家较多, 但总的来说, 小型无人机机体复合材料设计与制造过程中选择使用S-玻璃纤维布要多于E-玻璃纤维布。

表 2 玻璃纤维布性能指标

产品代号	厚度/ mm	拉伸断裂强力/ N·(25 mm) ⁻¹		玻璃纤维布 质量/ g·m ⁻²	编织结构
		经向	纬向		
EW60	0.060 ±0.005	280	280	52.0 ±5.0	平纹
EW100A	0.100 ±0.010	500	500	100.0 ±10.0	平纹
EW100B	0.100 ±0.010	500	400	100.0 ±10.0	平纹
无碱44布	0.24	1961	490		2/2斜纹
无碱74布	0.24	2206	294		缎纹
SW80B	0.080 ±0.008	500	500	80.0 ±8.0	2/2斜纹
SW100A	0.100 ±0.010	550	550	100.0 ±10.0	平纹
SW110C	0.110 ±0.011	600	600	110.0 ±10.0	四枚缎纹
SW200C	0.200 ±0.020	2300	400	200.0 ±20.0	四枚缎纹
SW210A	0.210 ±0.021	1600	1350	210.0 ±20.0	平纹
SW220C	0.220 ±0.022	1900	1600	240.0 ±20.0	四枚缎纹

综合考虑飞机结构用复合材料设计与制造工艺, 可合理选用平纹、斜纹、缎纹玻璃纤维布和玻璃纤维单向布等不同编织结构的玻璃纤维布。小型无人机使用的玻璃纤维布厚度主要为0.03~0.24 mm, 其中厚度较薄的平纹布和斜纹布多用于制造蜂窝夹层结构的面板, 单向布则主要用于机翼、机身梁等性能取向突出的主承力结构件的制造, 或机翼、机身缘条等部位的加强。此外, 玻璃纤维布的表面处理剂应为适合于环氧树脂基体的增强型浸润剂如FE-5, 最好选用经增强型浸润剂前处理的纱织成的玻璃纤维布。

用于手糊成型的玻璃纤维布的工艺性也是需要考虑的。事实上, S-玻璃纤维布比E-玻璃纤维布的手感更硬, 但国产S-玻璃纤维布的树脂浸润性及质量稳定性不太理想。另外, 虽然斜纹、缎纹玻璃纤维布的悬垂性比平纹布好, 手感柔软, 有良好的铺覆性, 强度也高于平纹布, 但稳定性比平纹布差, 使斜纹和缎纹玻璃纤维布在剪裁下料及糊制时较难保证纤维取向符合设计要求。

(2) 碳纤维与制品

碳纤维的密度小, 其比强度和比模量大大优于玻璃纤维^[8](见表1), 所以碳纤维及其织物在小型无人机机体复合材料制造中的用量正逐步增加。小型无人机的机翼梁、机身梁和尾撑杆等主承力结构件已较多地采用碳纤维复合材料制造, 而且碳纤维的低电阻特性也使其在飞机隐身设计中获得应用。虽然碳纤维布的用量在增加, 但因其价格大大高于玻璃纤维布, 特别是进口的0.1~0.28 mm厚碳纤维布要比国产的S-玻璃纤维布贵数十倍, 所以仅从控制成本的角度考虑, 对碳纤维制品的选用仍然

需要慎重对待。

碳纤维布的铺覆性好、树脂浸润性好,但因丝束粗、无捻,所以在剪裁下料和糊制时布的边缘容易脱丝或散乱,糊制时需仔细操作以保证纤维取向符合要求。碳纤维布在下料时边缘脱丝或散乱的问题可以通过用胶带粘贴封边的办法较好地解决。

碳纤维的生产厂家较多,碳纤维的类型和碳纤维织物的规格也较多,它们的性能差异也是较大的,可根据需要合理选用。对于小型无人机机体结构用复合材料来说,以使用高强度、标准型的 T300 为主,像尾撑杆等缠绕成型的制品通常采用碳纤维 T300-3k,至于碳纤维布则多数情况下使用的是由 T300-1k、T300-3k 织成的厚度为 0.10~0.28 mm 的平纹布或帘子布。表 3 给出了几种碳纤维布的技术指标^[9]。

表 3 碳纤维布的技术指标

牌 号	使用纤维		织物密度		织物厚度/mm	碳布质量/(g·m ⁻²)	编织结构
	经线	纬线	经向根数/cm	纬向根数/cm			
#6141	T300-1k	T300-1k	16	16	0.25	210	8 缎纹
#6142	T300-1k	T300-1k	9	9	0.15	120	平纹
#6151B	T300B-1k	T300B-1k	7	7	0.14	90	平纹
#6341	T300-3k	T300-3k	10	10	0.47	400	8 缎纹
#6342	T300-3k	T300-3k	12	3	0.35	300	4 缎纹
#6343	T300-3k	T300-3k	5	5	0.27	200	平纹
#6344	T300-3k	T300-3k	6	6	0.28	240	2/2 斜纹

2.2 树脂基体

手糊成型玻璃钢复合材料制品的树脂基体一般为室温固化体系。对于小型无人机机体结构件来说,所选树脂基体不但需要满足综合性能好的要求,还要满足室温下适用期长、粘度低等工艺性需要,以适应结构较复杂的复合材料结构件的成型。

为改善树脂基体的力学性能,特别是加工工艺性能,常常会选择性地在树脂体系中加入添加剂。不过,添加剂的加入同时会对某些性能产生不利影响,所以应权衡考虑添加剂的选择与用量。

环氧树脂体系具有优良的力学性能、突出的尺寸稳定性和形式多样、固化方便的特点,所以小型无人机机体所用的复合材料几乎都为环氧树脂体系。

手糊成型用室温固化树脂体系的耐热性不高,从严格意义上讲,通常难以达到结构材料理想的使用温度要求,实际运用时需具体情况具体分析与对待。

(1) 树脂

双酚 A 型环氧树脂 E-51 的粘度是环氧树脂中较低的,而且来源方便、价格低,且易于获得相应的固化剂。

(2) 固化剂

依据环氧树脂固化剂的选择原则并结合树脂基体的性能要求与工艺需要,选择了一种改性苯二甲胺固化剂。该固化剂为环氧树脂用低毒型室温固化剂,与环氧树脂 E-51 的配比比例为 100:(22~26),具有适用期长、固化发热量低、凝固点低、对空气中 CO₂ 敏感性低、可室温固化等良好工艺特点。

改性苯二甲胺固化剂的性能指标为:总胺值 600~650 mgKOH/g,凝固点小于 14℃,粘度 0.016 Pa·s,密度 1.054~1.065 g/cm³,半致死量大于等于 1430 mg/kg。

(3) 稀释剂与增韧剂

环氧树脂 E-51 与改性苯二甲胺固化剂制成的环氧树脂基体的冲击性能不理想,按比例配制的二组分树脂体系在室温下的粘度仍较大,手糊成型时胶液对增强材料的浸润性难以达到要求,并且会导致复合材料具有较高的含胶量。

要满足成型工艺对树脂体系的性能要求,需要在配方中加入稀释剂和增韧剂。苯二甲酸酯类材料既可起稀释剂的作用,又属于低分子的非活性增韧剂,因此加入适量的苯二甲酸酯可以降低环氧树脂的粘度,延长树脂固化体系的适用期,改善制品的冲击性能。

苯二甲酸酯能有效地降低体系粘度,但同时也导致制品的耐热性及力学性能降低,所以加入量需视具体情况而定。也可选择加入有利于提高树脂基体耐热性的活性稀释剂,但该类稀释剂往往有较强烈的刺激气味。

2.3 树脂基体性能

环氧树脂 E-51、改性苯二甲胺固化剂与适量苯二甲酸酯形成的树脂基体为室温固化体系,适用期较长,固化条件为室温下 7 d;或室温下 1 d,再在 60℃、80℃各后处理 1 h。该树脂基体的浇铸体在室温下的力学性能为:拉伸强度 63~72 MPa,冲击强度大于 27 kJ/cm²,弯曲强度 106~121 MPa,压缩强度 82~101 MPa。

2.4 玻璃钢性能

用上述树脂基体与不同玻璃纤维布糊制的玻璃钢(树脂含量为 45%~50%)在室温下的力学性能见表 4。

表 4 手糊成型环氧玻璃钢的力学性能

项 目	玻璃纤维布		
	EW 100A	SW100A	单向布(7:1)
拉伸强度 ¹⁾ /MPa	254	302	816
拉伸弹性模量 ¹⁾ /GPa	16.3	16.4	36.7
剪切强度/MPa	56.4	57.5	72.8
剪切弹性模量/GPa	7.8	12.0	9.5

注:1) 纵向拉伸性能。

3 袋压法成型工艺特点

小型无人机机体结构用复合材料制造过程主要由工艺设计、工艺试验、工装设计和具体操作等环节组成,在经过多种型号小型无人机的研制与生产后,已经形成了具有明显特色的适合于小型无人机玻璃钢蜂窝夹层结构成型的工艺与制造技术。

为了减重,小型无人机机体外形均设计为玻璃钢蜂窝夹层结构,同时,设计人员利用复合材料的可设计性,通常将机翼、机身结构中的梁缘条、肋缘条等主体受力结构以及力的扩散结构设计在结构件中,而且结构件中较多采用局部增加铺层、预埋件及蜂窝边缘加强等设计。总的来说,小型无人机机体复合材料结构件结构复杂、设计技术要求与质量控制要求高,因而主要结构件的制造工艺过程通常也是相当复杂的。

尽管小型无人机使用的玻璃钢蜂窝夹层结构形式复杂,但袋压法成型工艺通常以整体共固化的形式进行,即在模具中按顺序铺放外蒙皮、蜂窝和内蒙皮并按需要放置预埋件后一次性抽真空整体固化成型。这种玻璃钢蜂窝夹层结构成型工艺非常适合小型无人机机体的成型,所制造的结构整体性优异、质量相对较轻,其主要特点是直接采用已拉伸定型的片状蜂窝及预置件较多,因而如何根据设计需要在复杂曲面形状上放置并准确定位蜂窝和预埋件是该

方法的关键。

整体共固化袋压法成型玻璃钢及其蜂窝夹层结构也存在着不利因素,即薄壁的内蒙皮不可避免地会向蜂窝凹陷而出现不平整现象,而且蜂窝与外蒙皮间的胶瘤往往不均匀,蜂窝与蒙皮间的剥离强度也不是很高。不过,这种影响材料与结构性能的问题可通过设计补偿来解决,实际上这些问题在工程实际中已经得到了较好的解决。

4 结语

袋压法成型的复合材料结构件在小型无人机机体结构上应用较多,具有成型简便、成本较低、制造周期短的特点,易于整体成型大型复杂飞机结构件,而且其比强度、比刚度高的性能特点也能满足飞机结构轻量化的需要。

参考文献

1 沃丁柱,李顺林,王兴业,等.复合材料大全.北京:化学工业出版社,2000.

2 《国外无人机大全》编写组.国外无人机大全.北京:航空工业出版社,2001.

3 赵鹏飞,张元明,薛小平.小型无人机玻璃钢蜂窝夹层结构机翼的制造.玻璃钢/复合材料,1994(3):33

4 张元明,赵鹏飞,何颖,等.玻璃钢蒙皮/全腔填充泡沫塑料夹芯结构机翼设计.玻璃钢/复合材料,2003(1):17

5 赵鹏飞,张元明,何颖.玻璃钢蒙皮/聚氨酯泡沫塑料夹芯结构无人机机翼制造(一)工艺方案设计.玻璃钢/复合材料,2001(3):29

6 姜作义,张和善.纤维-树脂复合材料技术与应用.北京:中国标准出版社,1990.

7 《中国玻璃钢工业大全》编委会.中国玻璃钢工业大全.北京:国防工业出版社,1992.

8 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.

9 杨国华.碳纤维(下册).北京:中国物资出版社,1999.

APPLICATION OF COMPOSITE MOLDING BY VACUUM-ONLY CURE TECHNOLOGY
IN SUAV AIRFRAME

Zhang Yuanming, Zhao Pengfei, He Ying, Zhao Jingli
(Institute 365 of Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT The application of composites molding by vacuum-only cure technology in SUAV airframe is presented. The properties and selection of raw materials, and mechanical properties of composite airframe are described in detail, and the characteristics of molding technology are described.

KEYWORDS SUAV, composite, vacuum-only cure, technology, performance

新型聚苯醚合金可制高品质电缆线

GE 公司先进材料塑料部最近推出了两种新牌号聚苯醚合金: WCD910 和 WCP860。该产品的应用目标主要是替代在计算机、录像机、传真机、印刷、扫描仪及数码相机等上的

PVC 电缆线。这种新的软质聚苯醚树脂比软质 PVC 树脂轻 30%,挤出速度快于 PVC 树脂,同样属于无卤阻燃材料。其中 WCD910 主要用于直流电缆线涂层,WCP860 主要用于插头、插销涂层。

(周昂)