

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.12.011

碳纤维增强环氧树脂复合材料发动机壳体成型工艺

孟祥武, 郑志才, 肖亚超, 魏化震, 陈艳, 王强, 王明, 王尚, 常燕

(中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

摘要: 研制一种湿法缠绕环氧树脂体系, 并对其与国产 T700S 碳纤维浸润性、界面性能进行了考察。经视频光学接触角测量仪、纤维/树脂界面剪切强度仪测试证明, 该树脂体系能够很好浸润纤维, 界面性能优良; 通过黏-温关系、适用期的研究, 证明其能满足湿法缠绕的要求。然后通过设计正交实验, 对影响复合材料发动机壳体成型的工艺因素设置不同水平进行实验, 比较结果确定: 缠绕张力为 30 N、补强封头方法为纤维织物补强、应力平衡系数为 0.7、挤胶辊间隙为 0.20 mm、缠绕纱片带宽为 3 mm 时制作的复合材料发动机壳体特性指数 (PV/W 值) 最高 (39 km), 可为国产 T700S 碳纤维在复合材料发动机壳体上应用提供参考。

关键词: 碳纤维; 树脂体系; 复合材料发动机壳体; 成型工艺; 容器特性指数

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)12-0051-07

Manufacturing Process for Carbon Fiber Reinforced EP Composite Motor Vessels

Meng Xiangwu, Zheng Zhicai, Xiao Yachao, Wei Huazhen, Chen Yan, Wang Qiang, Wang Ming, Wang Shang, Chang Yan
(China North Industries Group Corporation Institute 53, Jinan 250031, China)

Abstract : A wet winding epoxy resin system was developed and its wettability and interfacial properties with domestic T700S carbon fiber were investigated. The test results of video optical contact angle measuring instrument and fiber/resin interface shear strength meter show that the resin system can well infiltrate the fiber, and the interface performance is excellent; through the study of viscosity temperature relationship and service life, it is proved that the resin system can meet the requirements of wet winding. Then, through the orthogonal experiment, different levels of technological factors affecting the forming of composite engine shell were tested. The results show that the winding tension is 30 N, the head reinforcement method is fiber fabric reinforcement, the stress balance coefficient is 0.7, the gap between the squeezer rollers is 0.20 mm, and the width of the winding yarn is 3 mm. The results show that the PV/W value of the composite engine case is the highest (39 km) at 3 mm, which can be served as references for the application of the domestic T700S carbon fiber in the field of composite motor vessels manufacture.

Keywords : carbon fiber ; resin system ; composite motor vessels ; manufacturing process ; vessel characteristic index

碳纤维复合材料发动机壳体变形小、刚度好, 可使推进剂药柱的变形减小, 同时相对其它纤维缠绕的壳体, 其与绝热层的粘接效果好, 在战术、战略导弹的发动机壳体等部件结构上应用广泛^[1]。

与湿喷湿纺碳纤维相比, 作为采用干喷湿纺法制备的低成本碳纤维, T700S 碳纤维具有高强度、近似圆形截面结构、较高准直度、表面光滑、沟槽浅且均匀的特点^[2-4], 决定了 T700S 碳纤维耐磨性好、成型过程中损伤小、纤维强度转化率高。

T700S 碳纤维目前主要是日本东丽公司生产, 近年来, 国内采取干喷湿纺法制备的 T700S 碳纤维取得了较好的成果, 逐步摆脱了对国外的依赖^[5-10], 但与东丽公司相比, 国产 T700S 碳纤维毛丝多、强度稍低且离散值大, 树脂浸润性能欠佳。因此, 对国产 T700S 碳纤维, 通过用其成型复合材料发动机壳体来探索适宜缠绕的树脂体系以及成型工艺, 对其进一步工程化的应用具有十分重要意义^[11]。

笔者研究了用国产 T700S 碳纤维成型复合材

通信作者: 孟祥武, 硕士, 副研究员, 主要从事碳纤维复合材料壳体缠绕成型工艺研究 E-mail: zhihong980@163.com

收稿日期: 2020-09-11

引用格式: 孟祥武, 郑志才, 肖亚超, 等. 碳纤维增强环氧树脂复合材料发动机壳体成型工艺[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(12): 51-57.

Meng Xiangwu, Zheng Zhicai, Xiao Yachao, et al. Manufacturing process for carbon fiber reinforced EP composite motor vessels[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(12): 51-57.

料发动机壳体的工艺,先从树脂体系入手,探索出一种适合国产 T700S 碳纤维湿法缠绕的环氧树脂体系,并通过对缠绕张力、封头补强方式、应力平衡系数、挤胶辊间隙、缠绕纱片带宽等因素取不同的影响水平进行筛选优化,探索出性能较佳的工艺组合,制得的发动机壳体容器特性指数 (PV/W 值) 达到 39 km,可作为国产 T700S 碳纤维在复合材料发动机壳体上工程化应用提供参考。

1 实验部分

1.1 原材料

环氧树脂: TDE-85, 天津晶东化学复合材料有限公司;

环氧树脂: E-51, 南通星辰合成材料有限公司;

芳香胺固化剂: E-300, 杭州崇舜化学有限公司;

混合环氧增韧剂: 自制;

碳纤维: T700S(12K), 江苏恒神股份有限公司;

碳纤维平纹布: T300(3K), 日本东丽公司。

1.2 设备和仪器

视频光学接触角测量仪: LSA200 型, 德国 LAUDA 公司;

纤维 / 树脂界面剪切强度仪: HM410 型, 日本东荣产业株式会社;

扫描电子显微镜 (SEM): QUANTA 200 型, 美国 FEI 公司;

微机控制电子万能材料试验机: 5969 型, 美国英斯特朗公司;

冲击试验机: XJ-300A 型, 吴忠材料试验机有限公司;

数显电热鼓风干燥箱: KH-35A 型, 广州市康恒仪器有限公司;

增力电动搅拌机: JD-50D 型, 上海标本模型厂;

普通电子天平: JA103N 型, 上海豪晟科学仪器有限公司;

烧杯: 容量 3 L, 四川蜀玻有限责任公司;

电热套: 容量 3 L, 巩义市予华仪器有限责任公司;

真空烘箱: DZF-6021 型, 上海恒科有限公司;

黏度计: SNB-1 型, 上海平轩科学仪器有限公司;

数控缠绕机: SKLCR50 / 500 型, 哈尔滨工业大学;

旋转固化烘箱: BJ3-2500 型, 吴江正达烘箱制

造有限公司;

电动试压泵: 4DSY 型, 饶阳鸿源机械有限公司。

1.3 试样制备

(1) 树脂浇注体。

图 1 为制备树脂浇注体工艺流程图。

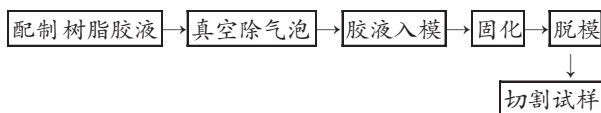


图 1 制备树脂浇注体工艺流程图

配制树脂胶液。用普通电子天平依次称量环氧树脂基体、固化剂、混合增韧剂放置于 3 L 的烧杯中,用玻璃棒搅拌均匀后放置于 3 L 的电热套中,边加热边搅拌,用黏度计每隔 1 min 测量黏度,控制黏度在 0.2 ~ 0.8 Pa·s 时,用温度计测量此时胶液的温度,并将胶液移出电热套。

真空除气泡。将盛有上述树脂胶液的烧杯放入真空加热干燥箱中 (箱内温度与上述最后胶液的温度相同) 抽真空,待抽除干净烧杯中气泡后,将烧杯取出。

胶液入模。在事先预热的模具中倒入胶液,视模具的大小确定加入量。

交联固化。通过烘箱仪器表盘设置胶液固化所需的温度及时间,使胶液充分交联固化。

脱模。树脂浇注体固化完毕后,自然冷却至室温,先从浇注体的一角用刀片轻轻撬出,然后整体取出固化后的浇注体。

切割试样。高压水切割固化后的浇注体得到标准试样,将切割面用砂纸打磨平整,以免产生应力集中。

(2) 复合材料发动机壳体制备。

图 2 为制备复合材料发动机壳体工艺流程图。

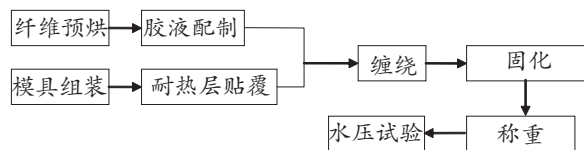


图 2 制备复合材料发动机壳体工艺流程图

纤维预烘。在电热恒温鼓风干燥箱中,放置国产 T700S 碳纤维预烘 24 h,将其所含的水分充分去除。

组装缠绕模具。组装壳体缠绕所需要的模具,并在模具成型表面涂好脱模剂,模具组装图如图 3 所示。



图3 缠绕成型复合壳体模具图

配制缠绕胶液。先将固化剂、环氧树脂基体、混合增韧剂在烧杯中均匀搅拌,然后放置于电热套中边搅拌边加热,等溶液黏度达到 $0.2 \sim 0.8 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时,停止加热,将其倒入胶槽中,此时设置胶槽温度与胶液温度一致。

缠绕。在缠绕机上放置组装好的模具,按逐层递减 5 N 的张力进行壳体结构层的缠绕。

固化。将缠绕完毕的复合材料壳体连同模具一起放在旋转固化烘箱中,设置好固化温度及时间,打开旋转开关,使复合材料壳体在旋转的状态下均匀固化,并随时查看壳体表面状态,待表面的胶液处于凝胶状态时,关闭旋转开关。

称重。将成型后的复合材料壳体放置于电子天平中进行称重,同时减去称量的两端金属连接件及内绝热层的质量,得到碳纤维增强环氧树脂复合材料的质量。

1.4 性能测试

(1) 树脂浇注体力学性能测试。

树脂浇注体的拉伸性能按照 GB/T 1040-2006 测试;

树脂浇注体的无缺口冲击强度按照 GB/T 1843-2008 测试。

(2) PV/W 值测试。

按照 GB/T 6058-2005 进行复合材料发动机壳体耐压强度测试,并按 PV/W 值进行容器特性指数(其中: P 为耐压强度、 V 为容器内容积、 W 为复合材料质量)的计算。

(3) 树脂黏度性能测试。

将被测树脂置于恒温油浴器中,进行同一温度不同时间及不同温度下黏度性能测试。

(4) 树脂/纤维界面接触角性能测试。

取一束约 15 cm 长的碳纤维复丝,分离出单丝,并用胶粘剂固定在样品夹上,然后用树脂液体涂覆单丝表面,得到界面接触角测试试样。

将以上制备好的试样放置于视频光学接触角测量仪的固定支座上,并调整仪器得到清晰的光学图像,通过软件自动分析得到树脂/纤维界面接触角。

(5) 树脂/纤维界面剪切强度性能测试。

将上述测试完毕后的树脂/纤维界面接触角试样放置于烘箱中,按 $120^\circ\text{C}/3 \text{ h}+160^\circ\text{C}/3 \text{ h}$ 固化后得到树脂/纤维界面剪切强度测试试样。

将以上制备好的试样放置于纤维/树脂界面剪切强度仪的固定支座上,并调整仪器以便从屏幕上得到清晰的光学图像,然后按 0.012 mm/min 的样品夹移动速度进行载荷的加载,通过屏幕观察树脂微球从纤维单丝上拉脱时即停止试验,并通过软件自动分析计算得到树脂/纤维界面剪切强度。

(6) SEM 测试。

试样冲击后的断面用丙酮清洗,待其挥发后,分两次真空镀金处理,用 SEM 观察并拍照。

2 结果与讨论

2.1 缠绕树脂性能分析

根据壳体设计的网格理论,复合材料发动机壳体在承受内压时主要靠纤维承受应力,缠绕树脂受力一般不予考虑,但缠绕树脂也对复合材料发动机壳体整体性能起着十分重要的作用,它不仅粘接纤维,还可将应力传递给纤维,因此,选择与纤维匹配的树脂也是一项重要的研究工作,笔者选择用三官能团缩水甘油酯类环氧 TDE-85 及缩水甘油醚类环氧 E-51 为主体树脂,固化剂选用低黏度、有较长适用期的液体芳香胺类固化剂,为防止环氧树脂固化交联密度太高引起的脆性大的缺点,选用自制的混合环氧增韧剂,该增韧剂中存在诸多柔性链节,可明显增强固化物的韧性,其浇注体力学性能见表 1。

表1 缠绕环氧树脂浇注体力学性能

拉伸强度 / MPa	拉伸弹性模量 / GPa	断裂伸长 率 /%	无缺口冲击强 度 / ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)
96	3.5	5.2	5.05

缠绕环氧树脂浇注体冲击断面的 SEM 照片如图 4 所示。由图 4 发现,树脂浇注体断裂面出现了鱼鳞状的裂纹,说明该树脂体系具有较好的韧性,在受力时这些鱼鳞状的裂纹能有效传递能量,提高其力学性能。

缠绕环氧树脂体系不仅要求环氧树脂具有较好的力学性能,还须在缠绕温度下具备合适的黏度

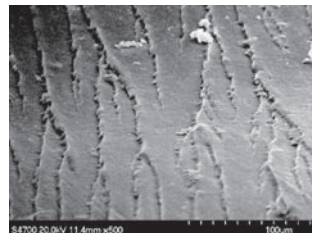


图4 缠绕环氧树脂浇注体冲击后断面 SEM 照片

以及较长的适用期,一般缠绕环氧树脂黏度控制在 $0.2 \sim 0.9 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ^[13],且为保证整个缠绕过程顺利进行,环氧树脂的黏度变化不能过大。所选的缠绕环氧树脂体系黏度-温度变化曲线、在 25°C 时 8 黏度-时间曲线分别如图 5、图 6 所示。

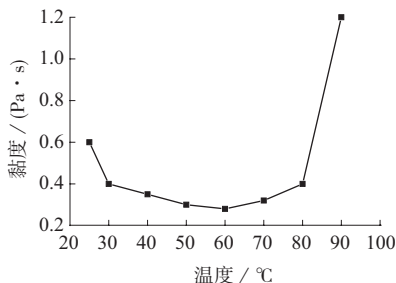


图5 缠绕环氧树脂体系黏度-温度曲线

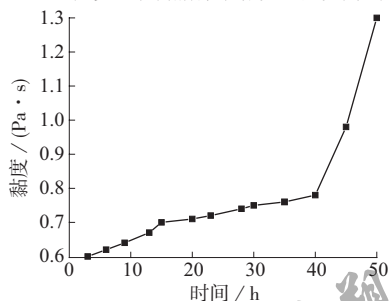


图6 缠绕环氧树脂体系黏度-时间曲线

由图 5 可看出,当温度低于 70°C 时,黏度随着温度的升高而降低,当温度高于 70°C 时,黏度随树脂交联反应进行明显升高,证明缠绕环氧树脂体系具有较好的黏度-温度特性。由图 6 可知,在 25°C 室温时,缠绕环氧树脂体系的黏度为 $0.649 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,且黏度随时间的延长缓慢增加,黏度经历 40 h 后增至 $0.781 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,仍在适合缠绕的黏度范围内,这个时间范围可满足复合材料发动机壳体缠绕成型要求。

2.2 环氧树脂/纤维界面性能

T700S 碳纤维由于干喷湿纺法制备,其光滑的表面可能不利于纤维和环氧树脂的粘接、浸润,造成纤维与树脂之间界面性能较差,而纤维与环氧树脂之间的界面在控制复合材料整体性能方面发挥着重要作用^[10-12],为考察笔者所选的环氧树脂体系与国产 T700S 碳纤维的浸润及界面性能,按所选环氧树脂配方分别配制 5 批试样,然后进行了环氧树脂/纤维接触角及环氧树脂/纤维界面剪切强度试验,测得环氧树脂/纤维接触角均值为 36.5° ,环氧树脂/纤维界面剪切强度均值为 75.2 MPa ,试验情况如图 7、图 8 所示。

由环氧树脂/纤维接触角 (36.5°) 可看出选用

的树脂体系能够有效地浸润国产 T700S 碳纤维,由环氧树脂/纤维界面剪切强度 (75.2 MPa) 可以看出,所用环氧树脂能够牢固地粘接国产 T700S 碳纤维,具有良好的界面性能,而良好的界面对复合材料的物理、化学及综合力学性能起至关重要作用^[13]。因此,所选用的环氧树脂体系具备良好的黏度-温度特性,具有较长的适用期,与纤维浸润性好,界面剪切强度高,是满足碳纤维复合材料发动机壳体缠绕工艺的一种性能优良的树脂体系。

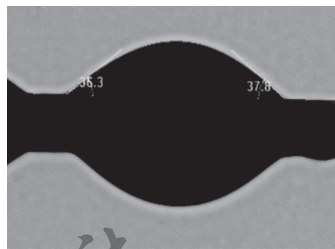


图7 环氧树脂/纤维接触角试验

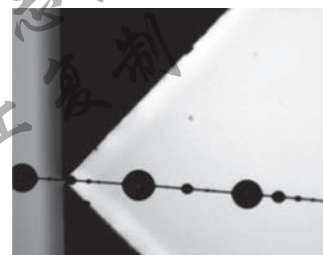


图8 环氧树脂/纤维界面剪切强度试验

2.3 正交实验

先设计正交实验,复合材料发动机壳体缠绕所受各种工艺因素影响较多,只对影响复合材料发动机壳体性能 (PV/W 值) 主要工艺因素进行考察,包括缠绕张力 (A)、补强封头方法 (B)、应力平衡系数 (C)、挤胶辊间隙 (D)、缠绕纱片带宽 (E)。

正交实验的因素及水平列于表 2。

表 2 实验因素与水平

水平	A/N	B	C	D/mm	E/mm
1	10	不补强	0.65	0.20	4.5
2	20	纵向补强 ¹⁾	0.70	0.25	4
3	30	纤维织物+纵向补强	0.75	0.30	3.5
4	40	纤维织物补强	0.80	0.35	3

注: 1) 纵向补强是先缠绕螺旋向,然后剪掉中间筒身段纤维,封头纤维得以保留的一种补强方法。

正交实验结果见表 3。由表 3 可以看出,比较各因素、水平 4 次 PV/W 值之和得到最优工艺组合为 $A_3B_4C_2D_1E_4$,由正交实验得到 PV/W 值最大的工艺组合为 $A_3B_2C_4D_1E_4$,确定为最终的最优工艺组合,按照 $A_3B_4C_2D_1E_4$ 工艺组合条件又成型了 1 件壳体,表 4 列出了实验的结果。

表3 $L_{16}(4^5)$ 复合材料发动机壳体 PV/W 值正交实验表

试验号	A	B	C	D	E	(PV/W 值)/km
1	A1	B2	C3	D2	E3	34.9
2	A3	B4	C1	D2	E2	37.3
3	A2	B4	C3	D3	E4	38.1
4	A4	B2	C1	D3	E1	34.5
5	A1	B3	C1	D4	E4	33.1
6	A3	B1	C3	D4	E1	27.2
7	A2	B1	C1	D1	E3	30.1
8	A4	B3	C3	D1	E2	35.0
9	A1	B1	C4	D3	E2	28.9
10	A3	B3	C2	D3	E3	36.9
11	A2	B3	C4	D2	E1	34.1
12	A4	B1	C2	D2	E4	29.6
13	A1	B4	C2	D1	E1	36.5
14	A3	B2	C4	D1	E4	38.4
15	A2	B2	C2	D4	E2	35.2
16	A4	B4	C4	D4	E3	35.1
K_1	133.4	115.8	135.0	140.0	132.3	K_1+K_2+
K_2	137.5	143	138.2	135.9	136.4	K_3+K_4
K_3	139.8	139.1	135.2	138.4	137.0	=544.9
K_4	134.2	147	136.5	130.6	139.2	= 总和
极差 R	6.4	31.2	3.2	9.4	6.9	

注: K_i 为水平 1 至水平 4 的 4 次 PV/W 值之和。

表4 复合材料壳体在不同工艺组合条件下成型后性能比较

工艺组合	(PV/W 值)/km
$A_3B_2C_4D_1E_4$	38.4
$A_3B_4C_2D_1E_4$	39

注: 以上实验固化温度和时间相同。

由表4可以看出,通过比较各因素各水平4次 PV/W 值之和得到的最佳工艺组合 $A_3B_4C_2D_1E_4$ 制作的壳体性能高于按正交实验得到的最佳工艺组合 $A_3B_2C_4D_1E_4$ 制作的壳体性能,由此,确定最佳工艺组合为:缠绕张力为 30 N、补强封头方法为纤维织物补强、应力平衡系数为 0.7、挤胶辊间隙 0.20 mm、缠绕纱片带宽为 3 mm。

图9为复合材料壳体破坏样貌图。其成型工艺组合为 $A_3B_4C_2D_1E_4$ 。从图9可以看出,由国产 T700S 碳纤维成型复合材料发动机壳体破坏位置在筒身处,此时纵、环向纤维同时发生破坏,纤维强度发挥较好^[12]。

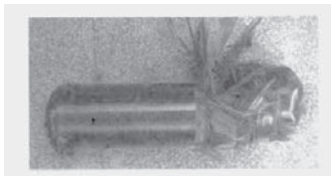


图9 复合材料发动机壳体破坏样貌图

2.4 正交实验各因素对 PV/W 值的影响分析

(1) 补强封头方法对 PV/W 值的影响。

由表3可以看出,补强封头方法这一项因素的

极差值为 31.2,是影响 PV/W 值的主要因素。因碳纤维是一种脆性材料,加之界面性能优良,因此在壳体受到内压作用时,封头部位处于拉、弯、剪共同作用下的复杂应力状态,容易在封头处发生低压破坏现象^[14]。因此,对复合材料发动机壳体进行封头补强是保证其性能最优发挥的有效措施。由表3可知,不采取补强措施的工艺组合其 PV/W 值都较低。各水平4次 PV/W 值之和由 115.8 km 先升后降,最后又升至 147 km,水平3的四次 PV/W 值之和降低的原因可能是选用该补强方式造成复合材料质量增加过多,进而导致 PV/W 值较低。

(2) 挤胶辊间隙对 PV/W 值的影响。

由表3可以看出,挤胶辊间隙这一因素的极差值为 9.4,是影响 PV/W 值的第二重要因素,该因素的4次 PV/W 值之和从水平1到水平4大体呈下降的趋势,由 140 km 大体降至 130.6 km,说明较小的挤胶辊间隙能够减少复合材料壳体缠绕过程中表面的浮胶,从而减少复合材料的消极质量,有利于 PV/W 值的提高。然而,并不是挤胶辊间隙越小越好,当小到一定程度时,会造成复合材料壳体贫胶,使树脂不能有效充满复合材料中的孔隙,以致出现缺陷,通过表5的实验(其它工艺水平同上述确定的最佳水平),可证明挤胶辊间隙小于 0.2 mm 时, PV/W 值出现降低。

表5 不同水平挤胶辊间隙成型复合材料发动机壳体性能比较

挤胶辊间隙/mm	(PV/W 值)/km
0.1	36.1
0.15	37.5
0.2	39

(3) 缠绕纱片带宽对 PV/W 值的影响。

从表3可知,缠绕纱片带宽这一因素的极差值为 6.9,也是影响 PV/W 值的第二重要因素,该因素的4次 PV/W 值之和由 132.3 km 逐渐升高至 139.2 km,推测该因素的前3个水平设置的带宽过宽,而过宽的纤维设计带距,会导致相邻纤维在缠绕过程中缝隙出现,使局部纤维不均匀受力,纤维强度的发挥在一定程度上受到影响^[15]。然而,并不是缠绕纱片带宽越小越好,当设计带距选取过小时,缠绕过程中局部纤维产生较多搭界,纤维在厚度方向上分布不均匀,存在内层纤维屈曲,易造成受内压作用时应力集中,致使断裂提前,同时也使壳体提前失效。通过表6实验(其它工艺水平同上述确定的最佳水平),可证明缠绕纱片带宽小于 3 mm 时, PV/W 值出现降低。

表6 不同水平缠绕纱片带宽成型壳体性能比较

缠绕纱片带宽/mm	(PV/W 值)/km
2	37.4
2.5	38
3	39

(4) 缠绕张力对 PV/W 值的影响。

由表3可以看出,缠绕张力这一因素的极差值为6.4,也是影响 PV/W 值的第二重要因素,该因素的3次 PV/W 值之和先由133.4 km增加至139.8 km,然后又降至134.2 km,复合材料的密实度可在施加一定的缠绕张力的作用下提高,纤维的取向性得到进一步提高,从而使碳纤维的拉伸性能充分发挥^[16]。缠绕张力在一定范围内增加可使碳纤维复合材料的含胶量下降,纤维体积含量随之升高,复合材料的质量减小, PV/W 值也升高。由表3可以看出,当缠绕张力由10 N增加至30 N时,逐步提高了4次 PV/W 值之和,但过大的缠绕张力(增加至40 N时),复合材料含胶量下降使得材料局部出现缺胶与孔隙等缺陷,过大的缠绕张力会使纤维在缠绕过程中发生磨损损伤,以上因素导致 PV/W 值降低(4次 PV/W 值之和降为134.2 km)。

(5) 应力平衡系数对 PV/W 值的影响。

由表3可以看出,3.2为应力平衡系数这一因素的极差值,是影响 PV/W 值的次要因素,该因素的4次 PV/W 值之和没有呈现一定的规律性,说明该因素对 PV/W 值的影响比较复杂,其值(k_s)与壳体圆筒段的缠绕角(α)有关,当 $\alpha \geq 35.26^\circ$ 时,取 $k_s=1$, $\alpha < 35.26^\circ$ 时, $k_s < 1$,笔者成型的复合材料壳体缠绕角 $\alpha=30^\circ$, $k_s < 1$ 。应力平衡系数主要是因圆筒纵向层和环向层纤维发挥强度略有不同,为使封头具有足够的强度而使纵向层加厚所引入的一个系数,由于成型的复合材料壳体已经对封头进行了补强,因此,应力平衡系数对 PV/W 值的影响较小,可忽略不计。

3 结论

研制了一种与国产T700S碳纤维匹配性较好的环氧树脂体系,对其黏度-温度、黏度-时间特性进行分析,并通过视频光学接触角测量仪、纤维/树脂界面剪切强度仪对所选环氧树脂体系同纤维浸润性、界面性能进行了表征,发现所用环氧树脂体系具备较好的黏度-温度特性,在室温下的试用期大于40 h,能满足缠绕工艺的要求。对影响复合材料发动机壳体成型的主要因素,设置不同的水平进行正交实验,得到成型复合材料发动机壳体的下列最

佳工艺条件组合:缠绕张力30 N、补强封头方法为纤维织物补强、应力平衡系数为0.7、挤胶辊间隙0.20 mm、缠绕纱片带宽为3 mm。

通过以上最佳工艺条件制作的复合材料发动机壳体容器特性指数为39 km,为国产T700S碳纤维应用于复合材料发动机壳体成型提供了很好的借鉴。

参考文献

- [1] 兰总金,祖磊,惠鹏,等.基于NOL环的高性能纤维与环氧树脂的匹配性研究[J].玻璃钢/复合材料,2018(3):45-51.
Lan Zongjin, Zu Lei, Hui Peng, et al. Study on interface compatibility of high-performance fiber and epoxy resin based on test of NOL rings[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2018(3):45-51.
- [2] 陈小平,王喜占.T800碳纤维在复合材料压力容器上的应用研究[J].高科技纤维与应用,2017,42(3):45-49.
Chen Xiaoping, Wang Xizhan. T800 carbon fiber in the application of composite pressure vessel research[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2017, 42(3):45-49.
- [3] 李国丽,彭公秋,王迎芬,等.国产T700级碳纤维增强双马树脂基复合材料的力学性能[J].航空材料学报,2017,37(2):63-72.
Li Guoli, Peng Gongqiu, Wang Yingfen, et al. Mechanical properties of domestic T700 grade carbon fibers / QY9611 BMI matrix composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(2):63-72.
- [4] Sun Pei, Zhao Yan, Luo Yunfeng, et al. Effect of temperature and cyclic hygrothermal aging on the interlaminar shear strength of carbon fiber / bismaleimide (BMI) composite[J]. Material & Design, 2011, 32:4 341-4 347.
- [5] 徐樵华.高性能PAN基碳纤维国产化进展及发展趋势[J].中国材料进展,2012,31(10):7-13.
Xu Lianghua. Development and trends of PAN-based high performance carbon fiber in China[J]. Materials China, 2012, 31(10):7-13.
- [6] 冯闻,徐樵华.围绕市场发展国产碳纤维制备及其应用技术[J].高科技纤维与应用,2013,38(3):12-24.
Feng Wen, Xu Lianghua. Based on the market to develop manufacture and application technologies of the native carbon fiber[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2013, 38(3):12-24.
- [7] 李崇俊,刘建军,刘勇琼,等.高性能聚丙烯腈基碳纤维工程化研制及应用进展[J].高科技纤维与应用,2011,36(5):7-14.
Li Chongjun, Liu Jianjun, Liu Yongqiong, et al. An engineering manufacturing and application of PAN-based carbon fibers[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2011, 36(5):7-14.
- [8] 孟祥武,郑志才,孙士祥,等.国产T700S碳纤维增强复合材料压力容器的成型工艺[J].工程塑料应用,2018,46(3):62-68.
Meng Xiangwu, Zheng Zhicai, Sun Shixiang, et al. Manufacturing

- process for domestic T700S carbon fiber reinforced composite pressure vessels[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(3):62-68.
- [9] 邓杰,成敏苏. 大尺寸 CFRP 固体火箭发动机壳体湿法缠绕用树脂配方研制 [J]. 宇航学报, 2010, 31(2):556-561.
- Deng Jie, Cheng Minsu. Research on resin formula of CFRP solid rocket engine shell with big dimension for wet winding[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(2):556-561.
- [10] 刘亚男,顾铁卓,李敏,等. 不同种类碳纳米管浸润剂对碳纤维 / 环氧树脂界面性能的影响 [C] // 第十七届全国复合材料学术会议论文集. 北京: 中国力学学会, 2012:1 057-1 062.
- Liu Yanan, Gu Yizhuo, Li Min, et al. Effects of different types of carbon nanotube wetting agents on interfacial property of carbon fiber / epoxy composites[C] // The seventeenth composite materials conference proceedings. Beijing: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2012:1 057-1 062.
- [11] 支建海,钱鑫,张永刚,等. 国产碳纤维增强树脂基复合材料的界面结合性能研究 [J]. 合成纤维工业, 2018, 41(4):14-17.
- Zhi Jianhai, Qian Xin, Zhang Yonggang, et al. Study on interfacial bonding strength of China-made carbon fiber reinforced resin matrix composites[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2018, 41(4):14-17.
- [12] 郑益飞,申明霞,段鹏鹏,等. 含 MWCNTs 玻璃纤维增强复合材料的力学和界面性能的研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2019(12):83-88.
- Zheng Yifei, Shen Mingxia, Duan Pengpeng, et al. Study on mechanical and interfacial properties of glass fiber reinforced composites containing MWCNTs[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2019(12):83-88.
- [13] 管培强,李艳霞,李敏,等. 碳纤维 / 环氧界面相准静态纳米压痕表征方法分析 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2012(6):23-27.
- Guan Peiqiang, Li Yanxia, Li Min, et al. Characterization on the interphase of carbon fiber / epoxy resin composites using the nanoindentation method[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2012(6):23-27.
- [14] 张世杰,王汝敏,廖英强,等. T800HB 碳纤维复合材料壳体量化等强度补强技术 [J]. 宇航材料工艺, 2018(3):51-55.
- Zhang Shijie, Wang Rumin, Liao Yingqiang, et al. Quantitative isostrength reinforcement of composite case made of T800HB carbon fiber[J]. Aerospace Materials & Technology, 2018(3):51-55.
- [15] 林松,张琳,高志琪,等. 国产 T700 碳纤维复合材料发动机壳体强度设计及成型工艺 [J]. 固体火箭技术, 2018, 41(5):614-620.
- Lin Song, Zhang Lin, Gao Zhiqi, et al. Strength design and fabricated technology of domestic carbon fiber T700 composite motor case[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2018, 41(5):614-620.
- [16] 林松,王俊峰,穆晗,等. 缠绕张力对薄壁金属内衬复合材料气瓶性能影响 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2015(10):26-30.
- Lin Song, Wang Junfeng, Mu Han, et al. Study of the influence of winding tension to the thin wall metal lining composite gas cylinder[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2015(10):26-30.

(上接第 40 页)

- [12] 张冰,闫维鹏,王博,等. 抗冲聚苯乙烯橡胶相粒径分布对光泽度及冲击性能的影响 [J]. 弹性体, 2020, 30(3):30-34.
- Zhang Bing, Yan Weipeng, Wang Bo, et al. Effect of particle size distribution of HIPS on glossiness and impact properties[J]. China Elastomerics, 2020, 30(3):30-34.
- [13] 陈奇海,方良超,霍绍新,等. 尼龙 11 的增强增韧改性研究 [J]. 现代塑料加工应用, 2019, 31(1):25-28.
- Chen Qihai, Fang Liangchao, Huo Shaoxin, et al. Study on strengthening and toughening modification of nylon 11[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2019, 31(1):25-28.
- [14] 金栋,崔小明. POE 增韧改性研究进展 [J]. 塑料助剂, 2018(6):11-13.
- Jin Dong, Cui Xiaoming. Research progress in the toughening modification of POE[J]. Plastics Additives, 2018(6):11-13.
- [15] 文健. 氧化石墨烯 / 尼龙 6 复合材料结晶动力学及增韧改性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- Wen Jian. Crystallization kinetics and toughening modification of graphene oxide/nylon 6 composites[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [16] Huang Juncheng, Lan Jianwu, Lin Shaojian. Synthesis and nonisothermal crystallization kinetics of thermoplastic polyamide - 6 elastomers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019. DOI:org/10.1002/app.47388.
- [17] Wang Yu, Kang Hongliang, Wang Rui. Crystallization of polyamide 56 / polyamide 66 blends: Non - isothermal crystallization kinetics[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018. DOI:10.1002/app.46409.
- [18] 吴其桦,巫静安. 高分子材料流变学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- Wu Qiye, Wu Jingan. Polymer rheology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.