

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.03.012

国产 T700S 碳纤维增强复合材料压力容器的成型工艺

孟祥武, 郑志才, 孙士祥, 陈艳, 王强, 王尚, 常燕, 安运成, 肖亚超

(中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

摘要: 分别采用扫描电子显微镜、傅立叶变换红外光谱仪对国产 T700S 碳纤维表面形貌及表面涂层进行了表征, 通过 NOL 环实验对两种树脂体系进行优选, 找到了一种与国产 T700S 碳纤维匹配性较好的树脂体系, 然后设计正交试验, 对影响 Ø150 mm 复合材料压力容器成型的因素设置了不同的水平, 通过正交试验比较, 最终确定缠绕张力为 40~50 N、封头补强方式为碳布补强环补强、胶槽温度 55~60℃、刮胶板和滚胶筒间隙 0.15~0.20 mm、缠绕后处理方式为玻璃布带环向/螺旋向各缠绕 1 层时, 制作的复合材料压力容器特性指数最高 (37.5 km), 可作为国产 T700S 碳纤维进一步工程化应用的参考。

关键词: 国产 T700S 碳纤维; 复合材料压力容器; 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(2018)03-0062-07

Manufacturing Process for Domestic T700S Carbon Fiber Reinforced Composite Pressure Vessels

Meng Xiangwu, Zheng Zhicai, Sun Shixiang, Chen Yan, Wang Qiang, Wang Shang, Chang Yan, An Yuncheng, Xiao Yachao
(Institute 53, China North Industries Group Corporation, Jinan 250031, China)

Abstract : Using scanning electron microscopy and fourier transform infrared spectroscopy, the surface morphology and coating of domestic T700S carbon fiber were characterized. By the NOL ring experiment, two kinds of resin system were optimized, and a better matching between the domestic T700S carbon fiber and the resin system was found. By orthogonal test, the different levels for influence factors according to Ø150 mm composite pressure vessel manufacturing process were set, through orthogonal test, the optimum conditions of the composite pressure vessels forming process were determined: the winding tension is 40~50 N, the type of dome reinforcement is carbon cloth ring reinforcing, the temperature of glue tank is 55~60℃, the gap between fractioning plate and roller is 0.15~0.20 mm, the type of winding postprocessing is one spiral-winding and one hoop-winding respectively using glass fiber strap, the vessel characteristic index value of the composite pressure vessels produced under the optimal conditions is highest (37.5 km). This work can be served as references for further application of the domestic T700S carbon fiber.

Keywords : domestic T700S carbon fiber; composite pressure vessel; manufacturing process; vessel characteristic index

T700S 碳纤维作为一种干喷湿纺法制备的低成本碳纤维, 具有强度高、截面结构近似圆形、表面光滑、内部缺陷少的特点^[1], 与湿法纺丝制备的碳纤维相比, 更适合复合材料压力容器类制品的缠绕成型。

近年来, T700S 级碳纤维的国产化研究取得了较好的成果, 逐步摆脱了对国外的依赖^[2-7], 目前国内干喷湿纺法制备的 T700S 碳纤维与日本东丽公司相比, 其强度略低, 且毛丝多, 离散值大, 质量不稳

定, 与树脂的浸润性差, 因此, 对复合材料压力容器类制品的成型来说, 探索适应国产 T700S 碳纤维缠绕的树脂体系以及成型工艺对国产 T700S 碳纤维下一步工程化应用具有重要意义。

笔者通过对某国产 T700S 碳纤维进行 Ø150 mm 标准压力容器的成型工艺进行了研究, 找到了一种与之匹配性较好的树脂体系, 并通过对缠绕张力、封头补强方式、胶槽温度、刮胶板和滚胶筒之间的间隙、缠绕后处理等工艺条件的优化设计,

通讯作者: 孟祥武, 工程师, 主要从事复合材料壳体成型工艺研究 E-mail: zhihong980@163.com

收稿日期: 2017-12-27

引用格式: 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.

探索出一种较好的工艺组合,其容器特性指数达到 37.5 km,可作为国产 T700S 碳纤维进一步工程化应用的参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

环氧树脂基体 A、环氧树脂基体 B、密封橡胶:自制;

芳香胺固化剂:E-300,杭州崇舜化学有限公司;

酸酐固化剂:HK-021,温州清明化工有限公司;

环氧增韧剂:669,安徽新远化工有限公司;

碳纤维:T700S (12K),国产;

碳纤维斜纹布:T300 (3K),国产;

玻璃布带:ET200-25,中材科技股份有限公司;

平板玻璃纸:20~60 g/m²,绍兴上虞德庆工贸有限公司。

1.2 主要设备和仪器

扫描电子显微镜 (SEM):QUANTA 200 型,美国 FEI 公司;

傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 仪:FTIR-7600 型,澳大利亚 Lambda 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;

高压水切割机:NC4020 型,瑞典 WJ 公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9140A 型,巩义市予华仪器有限公司;

普通电子天平:JZC-TSE 型,福州科迪电子科技有限公司;

电热套:容量 3 L,山东甄诚华鲁电热仪器有限公司;

真空加热干燥箱:ZC-CDKX 型,深圳市中创仪器设备有限公司;

黏度计:NDJ-5S 型,上海尼润智能科技有限公司;

数控龙门纤维缠绕机:SKLCR50/500 型,哈尔滨工业大学;

旋转干燥固化烘箱:JDXGH 型,淄博鑫火工贸有限公司;

电动试压泵:2DSY 型,莱阳市试压泵科技有限公司。

1.3 试样制备

(1) 树脂浇注体制备。

树脂浇注体制备工艺如图 1 所示。

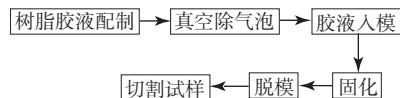


图 1 树脂浇注体制备工艺流程图

① 树脂胶液配制。

取一只烧杯,用普通电子天平依次称量环氧树脂基体 A、芳香胺固化剂 (或环氧树脂基体 B、酸酐固化剂) 放置于其中,用玻璃棒搅拌均匀后放置于电热套中,边搅拌边加热至合适的黏度。

② 真空除气泡。

将盛有上述配制好树脂胶液的烧杯放入已预先设置好温度的真空加热干燥箱中抽真空,待烧杯中的气泡抽除干净后,将烧杯取出。

③ 胶液入模。

将烧杯中的树脂胶液倒入事先预热的模具中,加入的量视模具的大小而定。

④ 固化。

分别按照环氧树脂基体 A 的固化制度:90℃/1.5 h→125℃/2 h→160℃/3 h、环氧树脂基体 B 的固化制度:120℃/1.5 h→135℃/2 h→155℃/3 h 设置烘箱固化温度和时间,使胶液固化。

⑤ 脱模。

固化完毕,待模具完全冷却后,用刀片轻轻撬开浇注体的一角,然后将固化后的浇注体整体取出。

⑥ 切割试样。

将固化后的浇注体通过高压水切割的方式得到标准试样。水切割完毕后,用金相砂纸打磨切割面至光滑,避免产生应力集中。

(2) NOL 环制备。

NOL 环制备工艺如图 2 所示。

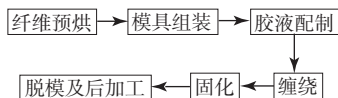


图 2 NOL 环制备工艺流程图

① 纤维预烘。

将一团 T700S 碳纤维放置于 100℃电热恒温鼓风干燥箱中预烘 24 h,充分去除其所含的水分。

② 模具组装。

将缠绕 NOL 环的模具清理干净并涂抹好脱模剂,组装好的模具如图 3 所示。

③ 胶液配制。

将环氧树脂基体 A 与芳香胺固化剂 (或环氧



图3 NOL环缠绕模具

树脂基体 B 与酸酐固化剂) 混合均匀,并在电热套中边加热边搅拌至合适黏度后,将其倒入胶槽中,并设置合适的胶槽温度。

④ 缠绕。

将组装好的模具放置于缠绕机上,按张力递减的制度进行缠绕。

⑤ 固化。

将缠绕完毕的模具放置于旋转干燥固化烘箱中,分别按照环氧树脂基体 A 的固化制度: $90^{\circ}\text{C} / 1.5\text{ h} \rightarrow 125^{\circ}\text{C} / 2\text{ h} \rightarrow 160^{\circ}\text{C} / 3\text{ h}$ 、环氧树脂基体 B 的固化制度: $120^{\circ}\text{C} / 1.5\text{ h} \rightarrow 135^{\circ}\text{C} / 2\text{ h} \rightarrow 155^{\circ}\text{C} / 3\text{ h}$ 设置烘箱固化温度和时间,边旋转边固化,待树脂凝胶后关闭旋转干燥固化烘箱。

⑥ 脱模及后加工。

将固化好的 NOL 环从模具中取出后,组装在芯轴上,完毕后在磨床上加工外径尺寸,拉伸试样外径尺寸加工至 153.30 mm ,对于层间剪切试样,先将外径尺寸加工至 156.30 mm ,然后再切割成层间剪切试样所需的尺寸。

(3) $\varnothing 150\text{ mm}$ 复合材料压力容器的制备。

$\varnothing 150\text{ mm}$ 复合材料压力容器制备工艺如图 4 所示。

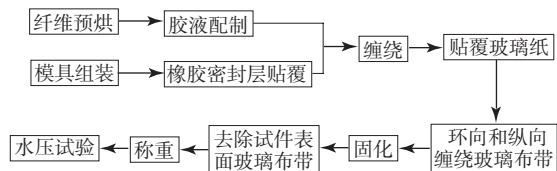


图4 复合材料压力容器制备工艺流程图

① 纤维预烘。

将一团 T700S 碳纤维放置于 100°C 电热恒温鼓风干燥箱中预烘 24 h ,充分去除其所含的水分。

② 模具组装。

首先将金属瓣模清理干净,并均匀涂抹脱模剂,然后将瓣模组装一体。

③ 橡胶密封层贴覆。

将压制好的橡胶密封层分别从组装好的模具两端装入,装好橡胶密封层的压力容器模具如图 5 所示。

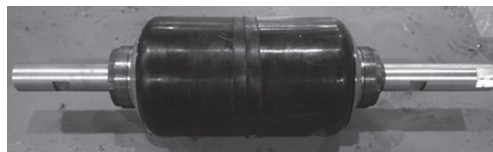


图5 复合材料压力容器缠绕模具

④ 胶液配制。

将环氧树脂基体 A 与芳香胺固化剂混合均匀,并在电热套中边加热边搅拌至合适黏度,停止加热,将其倒入胶槽中,并按正交试验的因素水平组合设置胶槽温度。

⑤ 缠绕。

按照预先设定的缠绕程序进行缠绕,张力按照正交试验的因素水平组合进行设置。

⑥ 贴覆玻璃纸。

将缠绕表面多余胶液用刮胶板刮除,然后在其表面贴覆一张平板玻璃纸并用手轻轻按压使其与缠绕表面充分接触。

⑦ 环向和纵向缠绕玻璃布带。

取 2 团 ET200-25 玻璃布带,一团用于手工环向缠绕,一团用于手工纵向缠绕,注意施加的张力尽可能的均匀一致。

⑧ 固化。

按照环氧树脂基体 A 的固化制度: $90^{\circ}\text{C} / 1.5\text{ h} \rightarrow 125^{\circ}\text{C} / 2\text{ h} \rightarrow 160^{\circ}\text{C} / 3\text{ h}$ 设置烘箱固化温度和时间,边旋转边固化,待树脂凝胶后关闭旋转干燥固化烘箱。

⑨ 试件表面玻璃布带的去除。

先脱模取出复合材料压力容器,然后将表面缠绕的玻璃布带以及玻璃纸用刀片小心清除。

⑩ 称重。

用电子天平称量复合材料压力容器的质量,减去金属件和橡胶密封层的质量,得到复合材料净质量。

1.4 性能测试

(1) 力学性能。

环氧树脂浇注体的拉伸性能按 GB/T 1040-2006 测试;

环氧树脂浇注体的无缺口冲击强度按 GB/T 1843-2008 测试;

NOL 环的拉伸性能按 GB/T 1458-2008 测试;

NOL 环的层间剪切性能按 GB/T 1461-1988 测试。

(2) 压力容器特性指数。

复合材料压力容器特性指数按 GB/T 6058-2005 测试。

2 结果与讨论

2.1 碳纤维表面性能表征

碳纤维的表面结构与性质直接影响复合材料的界面粘结性能,进而影响复合材料的宏观性能^[8]。笔者从碳纤维表面形貌、表面涂层的化学分析两方面对国产 T700S 碳纤维进行表征。

图 6 为国产 T700S 碳纤维的 SEM 表面形貌照片。

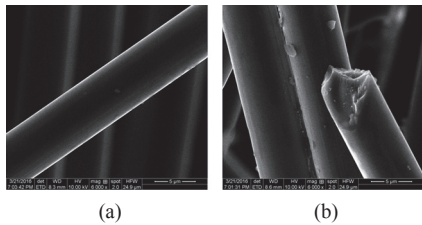


图 6 国产 T700S 碳纤维表面 SEM 照片
a—未加涂层;b—加涂层

从图 6a 可以发现,干喷湿纺法工艺制备的国产 T700S 碳纤维表面比较光滑。因为影响纤维与基体材料粘结性能的主要因素是机械摩擦力和化学键合力^[9-10],从机械摩擦力角度来说,光滑的表面不利于纤维和树脂的咬合,可能会造成国产 T700S 碳纤维与树脂的浸润性较差,因此要充分发挥其高的强度,对碳纤维进行表面涂层就显得尤为重要,合适的表面涂层可改善纤维的表面性能,提高纤维对基体的浸润性^[11-12]。

笔者所选用的国产 T700S 碳纤维表面添加了涂层,如图 6b 所示。FTIR 分析国产 T700S 碳纤维表面涂层的结果如图 7 所示,结果表明,碳纤维表面涂层中含有羰基(特征峰 1722 cm^{-1})、环氧基(特征峰 918 cm^{-1})、羟基(特征峰 3450 cm^{-1})等活性基团,因此通过表面涂层,国产 T700S 级碳纤维表面活性得到较大的改善。

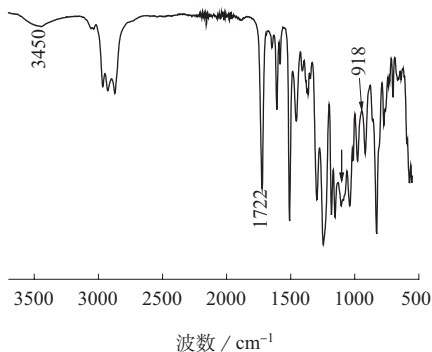


图 7 国产 T700S 碳纤维表面涂层 FTIR 谱图

2.2 树脂浇注体性能分析

复合材料制件虽然主要靠纤维承受应力,但作为基体的树脂同样扮演着重要的角色,树脂起粘接纤维的作用,同时将制件承受的压力传递给纤维,因此,选择与纤维匹配的树脂基体对提高制件的整体性能至关重要。

笔者通过前期进行的不同牌号的碳纤维与树脂的匹配性实验研究,优选出 2 种性能较好的环氧树脂体系(简称基体 A 和基体 B),其力学性能列于表 1。

表 1 环氧树脂浇注体力学性能

树脂体系	拉伸强度 /MPa	拉伸弹性模量 /GPa	断裂伸长率 /%	冲击强度 / ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)
基体 A	108	4.03	5.05	5.01
基体 B	111	4.26	5.18	5.11

由表 1 可以看出,两种基体制作的浇注体拉伸性能相差不大,因加入了含有脂肪族链段双环氧基化合物增韧剂 669,两种浇注体也都具有较高的断裂伸长率和冲击强度。

2.3 NOL 环力学性能分析

界面是复合材料极为重要的微结构,其性能的优劣直接影响基体与增强体之间的载荷传递效率,对复合材料的物理、化学及综合力学性能起着至关重要的作用^[13-14]。NOL 环不仅能判定树脂基体/纤维界面之间的浸润性及粘接性,还能初步考察复合材料在剪切及拉伸破坏时传递应力的能力^[15]。为了检验以上优选的树脂体系和国产 T700S 碳纤维的界面粘接性能,对其进行了 NOL 环实验,实验结果列于表 2。

表 2 不同树脂体系的 NOL 环的力学性能

树脂体系	拉伸强度 /GPa	拉伸弹性模量 /GPa	层间剪切强度 /MPa
基体 A	2.5	165	63
基体 B	2.4	160	55

由表 2 可见,两种树脂体系制作的 NOL 环的拉伸性能相差不大,但基体 A 与 T700S 碳纤维的层间剪切强度明显大于基体 B。以基体 A 为树脂体系制作的 NOL 环断裂面的形貌如图 8 所示。发现复合材料破坏断面较为齐整,无纤维拔出现象,表明纤维和树脂之间具有良好的界面粘接性能。因此选用基体树脂 A 作为缠绕复合材料压力容器的树脂体系。

2.4 正交试验

影响 $\varnothing 150\text{ mm}$ 标准复合材料压力容器缠绕的工艺因素很多,着重考察以下主要因素对成型复合

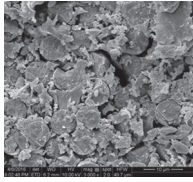


图8 NOL环断裂面的SEM图

材料压力容器性能的影响:缠绕张力、封头补强方式、树脂的黏度、树脂含量、缠绕后处理。其中树脂黏度通过胶槽温度的改变来控制;树脂的含量主要受缠绕张力、树脂黏度及刮胶板与滚胶筒的间隙等因素的影响。因为已经把缠绕张力和树脂黏度设置为单独的影响因素,在此只设置刮胶板和滚胶筒的间隙作为影响树脂含量的因素。

正交试验的因素及水平列于表3,正交试验结果列于表4。

表3 正交试验因素与水平

水平	缠绕张力(A)/N	封头补强方式(B)	胶槽温度(C)/℃	刮胶板与滚胶筒间隙(D)/mm	缠绕后处理(E)
1	20~30	不补强	40~45	0.15~0.20	未处理
2	30~40	碳布补强环补强	45~50	0.20~0.25	玻璃布带环向缠绕1层
3	40~50	缠绕补强	50~55	0.25~0.30	玻璃布带螺旋向缠绕1层
4	50~60	碳布补强环+筒身纵向补强	55~60	0.30~0.35	玻璃布带环向+螺旋向各缠绕1层

注:缠绕补强是指先螺旋缠绕,然后将筒身段纤维剪掉,只保留封头纤维。

表4 $L_{16}(4^5)$ $\Phi 150$ mm 标准压力容器特性指数正交试验结果 ($n=4$)

组号	A/ N	B	C/ ℃	D/ mm	E	压力容器特性指数/km
1	1	2	3	2	3	34.2
2	3	4	1	2	2	36.5
3	2	4	3	3	4	36.7
4	4	2	1	3	1	33.8
5	1	3	1	4	4	34.5
6	3	1	3	4	1	28.4
7	2	1	1	1	3	29.5
8	4	3	3	1	2	34.8
9	1	1	4	3	2	28.8
10	3	3	2	3	3	36.8
11	2	3	4	2	1	34.7
12	4	1	2	2	4	30.01
13	1	4	2	1	1	36.9
14	3	2	4	1	4	37.5
15	2	2	2	4	2	34.6
16	4	4	4	4	3	36.3
K_1	134.4	116.71	134.3	138.7	133.8	
K_2	135.5	140.1	138.31	135.41	134.7	
K_3	139.2	140.8	134.1	136.1	136.8	
K_4	134.91	146.4	137.3	133.8	138.71	
极差 R	4.8	29.69	4.21	4.9	4.91	

由表4可以看出,由正交试验得到的最佳工艺组合(试验号14)为 $A_3B_2C_4D_1E_4$,而根据各因素水平4次容器特性指数之和比较得到的最佳工艺组合为 $A_3B_4C_2D_1E_4$ 。为确定哪一组是最佳组合,按照 $A_3B_4C_2D_1E_4$ 的工艺条件制作了一压力容器,实验结果列于表5。

表5 两种工艺条件组合制作的压力容器性能比较

工艺组合	容器特性指数/km
$A_3B_2C_4D_1E_4$	37.5
$A_3B_4C_2D_1E_4$	36.9

注:两种工艺组合实验的固化温度和时间相同。

由表5可以看出,按正交试验得到的最佳工艺组合 $A_3B_2C_4D_1E_4$ 制作的压力容器的性能高于按 $A_3B_4C_2D_1E_4$ 组合制作的压力容器,因此,确定的最佳工艺条件为:缠绕张力40~50 N、封头补强方式为碳布补强环补强、胶槽温度55~60℃、刮胶板和滚胶筒间隙0.15~0.20 mm、缠绕后处理方式为玻璃布带环向/螺旋向各缠绕1层。

图9为按最佳工艺组合 $A_3B_2C_4D_1E_4$ 制作的 $\Phi 150$ mm 标准复合材料压力容器的破坏样貌图,由图9可见,国产T700S碳纤维制作的压力容器破坏位置在筒身处,且环向和纵向的纤维同时破坏,说明纤维的环、纵向的强度均得到了较好的发挥^[16]。

图9 $\Phi 150$ mm 标准复合材料压力容器破坏样貌图

2.5 正交试验各因素对容器特性指数的影响分析

(1) 封头补强方式。

从表4可以看出,封头补强方式因素的极差值为29.69,是影响压力容器特性指数的主要因素。因压力容器两端是金属连接件而筒身是纤维复合材料,两者相连接的封头部位处于拉伸、压缩、弯曲及剪切应力共同作用下的复杂应力状态^[17],最容易出现过早的破坏。由表4也可看出,不采取补强措施的工艺组合的压力容器特性指数都较低。由水平1到水平4,该因素的4次压力容器特性指数之和由116.71 km依次增加至146.4 km,然而通过表6实验结果发现,压力容器特性指数最高的并不是按水平4所制作的压力容器特性指数(35.3 km),而是按水平2制作的压力容器特性指数(37.5 km)。其原因

因可能是水平 3 和水平 4 的补强方式造成复合材料质量增加过多,进而导致容器特性指数降低。

表 6 采用不同补强方式制作的压力容器的性能比较

水平	爆破压力 / MPa	容积 / cm ³	复合材料质量 / g	压力容器特性指数 / km
2	24.2	4 870	315	37.5
3	26.3	4 864	354	36.1
4	27.2	4 869	375	35.3

(2) 缠绕后处理方式。

由表 4 可以看出,缠绕后处理方式这一因素的极差值为 4.91,是影响压力容器特性指数的二等重要因素。由水平 1 到水平 4,该因素的 4 次压力容器特性指数之和由 133.8 km 升高至 138.71 km,说明对压力容器进行缠绕后处理有利于提高压力容器特性指数,而且当环向和螺旋向同时处理时得到的 4 次压力容器特性指数之和最高 (138.71 km)。其原因可能是当用玻璃布带进行环向和螺旋向同时后处理时改善了缠绕制品的密实度,并且由于采用玻璃布带进行后处理时手工施加了张力使缠绕表面多余的胶液得以挤出造成含胶量的下降,进而使压力容器特性指数得到提高。

(3) 刮胶板与滚胶筒间隙。

由表 4 可以看出,刮胶板和滚胶筒间隙这一因素的极差值为 4.9,是影响压力容器特性指数的二等重要因素。由水平 1 到水平 4,该因素的 4 次压力容器特性指数之和总体呈减小趋势,最终由 138.7 km 减小至 133.8 km。笔者推测,当间隙增大时,会使纤维从胶槽中带出更多的缠绕树脂,进而造成压力容器制品含胶量和最终复合材料的质量增大,导致压力容器特性指数下降。通过查阅文献 [18] 可知,复合材料压力容器类制品的含胶量一般在 31%~35% 范围内。笔者对按最佳工艺条件制作的压力容器水压爆破后的残骸进行取样,并对其内纵向层和外环向层的树脂含量均进行了检测,其结果列于表 7。通过表 7 可以看出,内外层树脂含量相差不大,在文献 [18] 报道的范围内。

表 7 爆破后压力容器内外层的树脂含量

取样部位	树脂含量 / %
外环向层	32
内纵向层	34

(4) 缠绕张力。

由表 4 可以看出,缠绕张力这一因素的极差值为 4.8,是影响压力容器特性指数的二等重要因素。由水平 1 到水平 4,该因素的 4 次压力容器特性指数之和先由 134.4 km 增加至 139.2 km,然后又降

至 134.91 km。缠绕张力是影响复合材料压力容器中空隙率及纤维体积分含量的直接因素^[19]。在一定范围内,增加缠绕张力可以减少制品的空隙率,同时使富余的胶液浮出复合材料表面而被除去,纤维体积分含量随之升高,所以由表 4 可以看出,当缠绕张力由 20~30 N 增加至 40~50 N 时,压力容器特性指数逐步提高,但是缠绕张力过大 (50~60 N),会使纤维在缠绕过程中发生磨损损伤,反而使压力容器特性指数降低 (134.91 km)。

(5) 胶槽温度。

由表 4 可以看出,胶槽温度这一因素的极差值为 4.21,也是影响压力容器特性指数的二等重要因素。由水平 1 到水平 4,该因素的 4 次压力容器特性指数之和没有呈现一定的规律性,说明该因素对容器特性指数的影响比较复杂。该因素水平选择的总体原则是:控制胶槽温度使缠绕树脂的黏度控制在最佳适合缠绕范围 (0.2~0.8 Pa·s)^[20] 内,并且要有足够的使用期。

通过上述正交试验确定的最佳胶槽温度为 55~60℃,然后通过黏度计测定该树脂体系在 55~60℃ 时不同时间段的黏度可以发现,初始黏度在 0.46 Pa·s 左右,8 h 后的黏度变为 0.54 Pa·s,只升高了 17.4%,因此该树脂体系在该胶槽温度下有足够长的适应期,能够满足复合材料压力容器的缠绕要求。

3 结论

首先通过 NOL 环实验找到与国产 T700S 碳纤维匹配性较好的树脂体系 A,并通过 SEM 对其破坏样貌进行分析,然后分析影响 Ø150 mm 复合材料压力容器成型的主要因素,并设置不同的水平进行正交试验,通过正交试验,找到了 Ø150 mm 复合材料压力容器成型的最佳工艺条件:缠绕张力为 40~50 N、封头补强方式为碳布补强环补强、胶槽温度为 55~60℃、刮胶板和滚胶筒间隙为 0.15~0.20 mm、缠绕后处理方式为玻璃布带环向/螺旋向各缠绕 1 层。通过上述最佳工艺条件制作的压力容器特性指数为 37.5 km,可作为国产 T700S 碳纤维进一步工程化应用的参考。

参考文献

- [1] 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.

- [2] 罗益峰. 世界 PAN 基碳纤维发展透析及对我国的研发建议 [J]. 材料导报, 2000, 14(11):11-13.
Luo Yifeng. Developing analysis of world's PAN-based carbon fibers and it's R & D suggestions in China[J]. Materials Review, 2000, 14(11):11-13.
- [3] 张凤翻, 申屠年. 国产碳纤维规模化应用值得注意的几个工艺性问题 [J]. 高科技纤维与应用, 2008, 33(3):1-4.
Zhang Fengfan, Shen Tunian. Noteworthy technology problems of carbon fibers in the large scale application[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2008, 33(3):1-4.
- [4] 罗益峰, 申屠年. 2007 年中国高性能纤维展望 [J]. 高科技纤维与应用, 2007, 32(1):1-3.
Luo Yifeng, Shen Tunian. Prospects for China high performance fibers in 2007[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2007, 32(1):1-3.
- [5] 徐樑华. 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, 徐樑华. 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] 石峰晖, 代志双, 张宝艳. 碳纤维表面性质分析及其对复合材料界面性能的影响 [J]. 航空材料学报, 2010, 30(3):43-47.
Shi Fenghui, Dai Zhishuang, Zhang Baoyan. Properties of carbon fibers and interfacial properties of carbon fibers reinforced matrix composite [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(3):43-47.
- [9] 罗云烽, 李阳, 肇研, 等. 国产 T800 级碳纤维表面特性及其复合材料微观界面性能 [J]. 材料工程, 2014(9):83-88.
Luo Yunfeng, Li Yang, Zhao Yan, et al. Surface characteristics of domestic T800-grade carbon fibers and microscopic interphase properties of composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(9):83-88.
- [10] 陈淙洁, 张明, 王春红, 等. 四种碳纤维表面理化特性研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2012(S1):73-80.
Chen Zongjie, Zhang Ming, Wang Chunhong, et al. Study on surface physicochemical properties of four types carbon fibers[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites Supplement, 2012(S1):73-80.
- [11] 崔荣庆, 谌磊, 李春红, 等. 电化学氧化处理对 PAN 基碳纤维表面浸润性的影响 [J]. 材料导报, 2012, 26(1):40-48.
Cui Rongqing, Chen Lei, Li Chunhong, et al. Study on wettability of electrochemically oxidized PAN-based carbon fibers[J]. Materials Review, 2012, 26(1):40-48.
- [12] 钱鑫, 支建海, 张永刚, 等. 碳纤维表面化学结构对其增强环氧树脂基复合材料性能的影响 [J]. 材料工程, 2014(6):84-88.
Qian Xin, Zhi Jianhai, Zhang Yonggang, et al. Effect of surface chemical structure of carbon fiber / epoxy composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(6):84-88.
- [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 nano-indentation method[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2012(6):23-27.
- [14] 王百亚, 张康助, 雷海峰, 等. F-12 纤维 / RE14 复合材料压力容器成型工艺研究 [J]. 宇航材料工艺, 2003, 33(4):39-42.
Wang Baiya, Zhang Kangzhu, Lei Haifeng, et al. A study of manufacturing process for F-12 fiber / RE14 composite pressure vessels[J]. Aerospace Materials & Technology, 2003, 33(4):39-42.
- [15] 王晓洁, 张伟, 谢群伟. 热塑性树脂改性环氧基体配方研究 [J]. 宇航材料工艺, 1999, 29(2):21-23.
Wang Xiaojie, Zhang Wei, Xie Qunwei. Research on epoxy system modified by thermoplastic resin[J]. Aerospace Materials & Technology, 1999, 29(2):21-23.
- [16] 陈平, 蹇锡高, 陈辉. 碳纤维复合材料发动机壳体用韧性环氧树脂基体的研究 [J]. 复合材料学报, 2002(2):24-27.
Chen Ping, Jian Xigao, Chen Hui. Study for toughened epoxy resins matrix for carbon fiber composite motor case[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2002(2):24-27.
- [17] 郭峰, 张伟, 王晓洁, 等. 碳纤维 / 环氧固体火箭发动机壳体补强现状 [J]. 纤维复合材料, 2008, 35(3):35-38.
Guo Feng, Zhang Wei, Wang Xiaojie, et al. The present reinforcement state of carbon fiber / epoxy solid rocket motor shell[J]. Fiber Composites, 2008, 35(3):35-38.
- [18] 王晓洁, 张伟, 刘炳禹. 碳纤维湿法缠绕基体配方及成型研究 [J]. 固体火箭技术, 2001, 24(1):60-63.
Wang Xiaojie, Zhang Wei, Liu Bingyu. Study on the matrix formulation and forming for carbon fiber composites in wet-winding process[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2001, 24(1):60-63.
- [19] 王晓洁, 梁国正, 李辅安, 等. T-1000 碳纤维 / 环氧树脂基复合材料性能研究 [J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(5):540-543.
Wang Xiaojie, Liang Guozheng, Li Fuan, et al. Study on the property of T-1000 carbon fiber / epoxy resin composite[J]. Materials Science and Technology, 2005, 13(5):540-543.
- [20] 黄业青, 张康助, 王晓洁. 碳纤维湿法缠绕用环氧树脂基体研究 [J]. 热固性树脂, 2007, 22(1):27-29.
Wang Yeqing, Zhang Kangzhu, Wang Xiaojie. Research on epoxy resin matrix / carbon fiber composite by wet winding[J]. Thermosetting Resin, 2007, 22(1):27-29.