

# 空间推进系统用铝内衬 PBO 纤维缠绕高压气瓶的研制

王晓蕾 沈峰 童喆益 叶臻恺 田杰

(上海复合材料科技有限公司, 上海 201112)

**文 摘** 以空间推进系统用高压复合材料气瓶的开发为背景,开展了 PBO 纤维的应用研究。分别对 PBO/D-3 和 PBO/D-8 复合材料力学性能进行了测试,获得了性能最佳的复合材料配方体系。在此基础上,将 PBO 复合材料用于空间推进系统用铝内衬复合材料高压气瓶,开展了 2.4 L 铝内衬高压气瓶的研制。结果表明:PBO (HM)/D-8 复合材料力学性能最佳,其拉伸强度与 NOL 层间剪切强度分别高达 1 397 MPa 和 20.2 MPa,采用其缠绕的复合材料气瓶结构系数高达 64.5 km。

**关键词** PBO 纤维, 空间推进系统, 复合材料气瓶, 铝内衬

## Development of PBO Fibre Wound Thin Wall High Pressure Vessel With Aluminum Liner Used in Space Propulsion System

Wang Xiaolei Shen Feng Tong Zheyi Ye Zhenkai Tian Jie

(Shanghai Composites Science & Technology Co., Ltd, Shanghai 201112)

**Abstract** Based on the development of composite vessel used in space propulsion system, the applied research of PBO filament was developed. By the mechanical property tests of PBO/D-3 and PBO/D-8, the optimum composite system was obtained. Furthermore, the design, process and test of PBO filament wound thin wall high pressure vessel with aluminum liner were also studied. The results showed that, the optimum composite was PBO HM (high modulus)/D-8. The tensile strength and NOL ring interfacial shear strength can reach 1397 MPa and 20.2 MPa respectively. The maximum vessel performance factor with PBO HM/D-8 is 64.5 km

**Key words** PBO fibre, Space propulsion system, Composite vessel, Thin wall aluminum liner

### 0 引言

高压气瓶的空间应用非常广泛,如空间推进系统各种气瓶、空间站环控和生命支撑系统压力容器等。复合材料气瓶的质量仅为钛合金的 40% 左右,且具有破裂前先泄漏(LBB)的疲劳失效模式,可增大有效载荷比、降低发射成本。目前,国外卫星、运载火箭和导弹等航天系统传统钛合金高压气瓶已逐渐被复合材料缠绕高压气瓶取代<sup>[1]</sup>。

复合材料气瓶相比传统全金属气瓶具有质量轻、抗爆、可监控、结构设计灵活等特点<sup>[2]</sup>,其常用缠绕层材料为碳纤维增强环氧树脂基复合材料(CF/EP),具有比强度、比模量高、线胀系数小等特性。PBO 纤维(聚对苯撑苯并二噁唑,分子式见图 1)是一

种新型高性能有机纤维,具有极优异的力学、耐高温性能以及更高的比强度。空间推进分系统使用的复合材料气瓶要求质量轻,需实现较高的气瓶容重比。PBO 纤维的出现提供了一个更佳的选择方案。

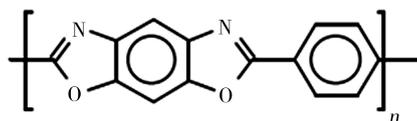


图 1 PBO 分子式

Fig. 1 Molecular formula of PBO

虽然 PBO 纤维具有优异的力学、耐化学性能以及高热稳定性,但是其表面非常光滑,分子链上缺乏

活性基团,化学活性低,呈现很强的惰性,与树脂基体间的界面粘结性能很差,这极大影响了纤维力学性能的充分发挥,严重制约了 PBO 纤维在高性能复合材料中的应用。本文将以优化 PBO 纤维与树脂匹配性为研究目标,在获得高性能 PBO 复合材料体系的基础上,开展 2.4 L 高压气瓶的研制。

## 1 试验

### 1.1 原材料

环氧树脂体系 D-3 及 D-8。

分别选用东洋纺公司牌号为 AS(普通)-1670 和 HM(高模)-1640 的 PBO 纤维为增强材料,其部分物理性能见表 1。

表 1 PBO 纤维的部分物理性能

Tab.1 Physical properties of PBO

| 纤维<br>牌号 | 线密度<br>/g·(1000m) <sup>-1</sup> | 拉伸强度<br>/GPa | 拉伸模量<br>/GPa | 断裂伸长率<br>/% |
|----------|---------------------------------|--------------|--------------|-------------|
| PBO-AS   | 167                             | 5.8          | 180          | 3.5         |
| PBO-HM   | 164                             | 5.8          | 270          | 2.5         |

### 1.2 仪器

CMT5150 电子拉力机,悬挂式连续固化炉(中国上海源正实验仪器有限公司),数控缠绕机(德国百事达公司),GCHST-II 型气瓶爆破试验系统(大连理工大学)。

### 1.3 试样制备及性能测试

#### 1.3.1 树脂浇铸体性能测试

将混合后的树脂倒入模具中,固化后按照 GB/T2568—2005 进行测试。

#### 1.3.2 单向板性能测试

分别制作 1 mm 和 2 mm 厚的单向板进行性能测试,具体测试项目如表 2 所示。

表 3 气瓶技术指标

Tab.3 Technical index of vessel

| 项目   | 气瓶容积<br>/L          | 工作压力<br>/MPa | 结构质量<br>/kg | 残余变形<br>率/% | 最小爆破<br>压力/MPa | 循环寿命<br>(0~35~0MPa)/次 | 缠绕层结<br>构系数/km |
|------|---------------------|--------------|-------------|-------------|----------------|-----------------------|----------------|
| 技术指标 | 2.4 <sup>+0.2</sup> | 35           | ≤1.5        | <5          | ≥70            | ≥100                  | 62             |
| 标准   | -                   | -            | -           | -           | GB/T15385—2011 | GB/T9252—2001         | -              |

## 2 结果与讨论

### 2.1 中温固化树脂基体的选择

PBO 纤维线胀系数为负值( $-6 \times 10^{-6}/K$ )<sup>[3]</sup>,在采用大预应力湿法缠绕工艺的过程中,较高的固化温度会造成薄壁大直径气瓶内部气体的高度膨胀和 PBO 纤维的高度收紧,相反的作用力在一定程度上会加大内胆在固化过程中所受的载荷。为了避免在固化过程中可能出现的失稳现象,需采用中低温固化树脂体系。

表 2 复合材料性能测试项目

Tab.2 Property tests of PBO composite material

| 测试项目  | 尺寸/mm    | 测试标准             |
|-------|----------|------------------|
| 0°拉伸  | 230×15×1 | GB/T 1447—2005   |
| 90°拉伸 | 25×170×1 | GB/T 1447—2005   |
| 层间剪切  | 20×6×2   | GB/T 1450.1—2005 |
| 0°弯曲  | 80×15×2  | GB/T 1449—2005   |

### 1.3.3 NOL 环性能测试

将 PBO 纤维浸润过树脂后,依照相关标准,在模具上缠绕成 NOL 环形状,固化后按照 GB/T1461—2005 及 ASTM D2344 进行 NOL 层间剪切性能测试。

### 1.3.4 气瓶的缠绕

2.4 L 铝内胆的尺寸见图 2。以气瓶工作压力为依据,按照预设计的缠绕方案,在缠绕机上完成气瓶复合材料层的缠绕。将缠绕后的气瓶放入固化炉中,启用固化程序进行固化,再经过打磨、修补等工艺制造出全缠绕复合材料气瓶样件。

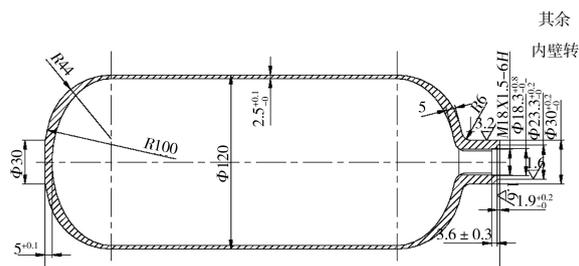


图 2 气瓶铝内胆尺寸图

Fig.2 Dimension figure of vessel liner

### 1.3.5 气瓶性能测试

按照表 3 中的设计指标,对气瓶进行了性能测试。

另外,相关研究表明,高伸长率、高强度树脂基体能使纤维的强度得到充分发挥,但是对于 PBO 复合材料壳体,需要足够的刚度来保证壳体在承受内压时的变形在一定范围内,因此树脂又必须有较高的模量,而高强度、高伸长率和高模量是一组矛盾体<sup>[4]</sup>。

根据湿法缠绕工艺的要求,结合 PBO 纤维固化过程以及气瓶使用过程中的要求确定树脂体系配方的研究目标为:

(1) 拉伸强度>60 MPa;

- (2) 拉伸模量在 2.5 ~ 4.0 GPa;
- (3) 断裂伸长率 > 4.0% ;
- (4) 使用环境温度要求 -45 ~ +70℃ ;
- (5) 最高固化温度 ≤ 120℃ 。

通过相关调研,分别选择了 D-3 和 D-8 树脂体系作为研究对象。两种树脂浇铸体的拉伸强度、模量和断裂伸长率测试结果见表 4。可以看出,两种树脂浇铸体力学性能差别不大,其中 D-8 的拉伸强度为 74 MPa,相对于 D-3 的拉伸强度增大了约 8%。

表 4 树脂浇铸体测试标准及结果

Tab. 4 Test results of resin casting body

| 树脂体系 | 拉伸强度 /MPa | 拉伸模量 /GPa | 断裂伸长率 /% |
|------|-----------|-----------|----------|
| D-3  | 68.1      | 3.0       | 4.5      |
| D-8  | 74.0      | 2.9       | 4.5      |

综上所述,D-8 相对于 D-3 拉伸强度增大了约 8%。在复合材料性能的研究过程中,则主要考察改性前后两种树脂与 PBO 纤维的浸润性。

## 2.2 PBO 纤维的筛选及其复合材料性能

表 5 复合材料性能测试结果

Tab. 5 Test results of PBO composite materials

| 材料         | 0°拉伸强度/MPa | 0°拉伸模量/GPa | 弯曲强度/MPa | 弯曲模量/GPa | 层间剪切强度/MPa |
|------------|------------|------------|----------|----------|------------|
| PBO AS/D-3 | 540        | 75.4       | 398      | 51.0     | 32.9       |
| PBO AS/D-8 | 1283       | 83.7       | 467      | 62.8     | 39.7       |

表 6 复合材料性能测试结果

Tab. 6 Test results of PBO composite materials

| 材料         | 0°拉伸强度/MPa | 0°拉伸模量/GPa | 弯曲强度/MPa | 弯曲模量/GPa | 层间剪切强度/MPa |
|------------|------------|------------|----------|----------|------------|
| PBO AS/D-8 | 1283       | 83.7       | 467      | 62.8     | 39.7       |
| PBO HM/D-8 | 1397       | 101        | 440      | 75.0     | 52.7       |

### 2.2.2 复合材料 NOL 环性能

考虑到压力容器受内压作用时,层与层之间的剪切作用十分关键,太低的层间剪切强度有可能导致容器低压爆破。此外,文献[5-6]表明,虽然压力容器在受内压作用时,纤维受力情况很复杂,但是高的层间剪切强度能保证较高的容器爆破压力,有助于提高复合材料高压容器的结构系数。因此,分别对 PBO AS/D-8 及 PBO HM/D-8 复合材料进行了 NOL 环层间剪切强度试验。

测试结果表明:PBO HM/D-8 复合材料 NOL 环的层间剪切强度为 20.2 MPa,略高于 PBO AS/D-8 复合材料的层间剪切强度(18.0 MPa),PBO HM/D-8 复合材料性能较优。

综上所述,可以看出 PBO HM/D-8 复合材料的宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013 年 第 4 期

PBO 纤维属于高强、高伸长率增强体,因此在制备其连续纤维复合材料时,也要求树脂基体具有高强高伸长率。结合表 4 可以看出,D-3 与 D-8 两种树脂的断裂伸长率均为 4.5%,远大于两种 PBO 纤维的断裂伸长率,因而树脂与增强体是基本匹配的。

### 2.2.1 复合材料单向板性能

PBO AS/D-3 和 PBO AS/D-8 单向板相关的测试结果见表 5,可以看出,D-8 复合材料的各项力学性能均较优,尤其是拉伸强度相对于 D-3 复合材料提高了约 68%,这可能是由于 D-8 树脂体系与 PBO 纤维的浸润性较好。由此可知,相对于 D-3,D-8 树脂体系的整体性能较优,因而选择其为 PBO 气瓶的目标树脂体系。在初步选择了主体树脂体系的基础上,对 PBO 纤维的种类进行了进一步的筛选。按照上述步骤,分别制备了 PBO AS/D-8 和 PBO HM/D-8 单向板,并对其力学性能进行了相关的测试(表 6)。测试结果表明,两种复合材料的拉伸强度相近,但是 PBO HM/D-8 复合材料的模量比 PBO AS/D-8 高了近 20%,且其整体力学性能也较优。

综合性能较优,因而选择其为 2.4 L PBO 高压气瓶的复合材料缠绕层。

### 2.3 2.4 L PBO 高压气瓶的缠绕

按照设计方案,完成了 2.4 L PBO 高压气瓶的缠绕,在缠绕过程中着重通过调整工艺参数(缠绕张力/缠绕角)来保证气瓶质量、爆破压力以及结构系数等指标要求,具体采取的措施为:

(1) 采用理论计算结合试验验证的方法,优化缠绕线型。

(2) 缠绕过程通过控制缠绕张力、控制纤维浸胶量和过程刮胶等方法,控制缠绕层含胶量,达到减重目的。

### 2.4 2.4 L PBO 纤维高压气瓶的性能

根据设计指标要求,分别进行了相关的试验测

试,结果见表7。可知,研制的2.4 L铝内衬PBO缠绕高压气瓶可满足设计要求,其缠绕层效率高达

64.5 km。

表7 2.4 L PBO 高压气瓶技术指标实现情况  
Tab.7 Test results of 2.4 L PBO high pressure vessel

| 项目   | 气瓶容积<br>/L          | 工作压力<br>/MPa | 结构质量<br>/kg | 残余变形<br>率/% | 最小爆破<br>压力/MPa | 循环寿命<br>/次 | 缠绕层结<br>构系数/km |
|------|---------------------|--------------|-------------|-------------|----------------|------------|----------------|
| 技术指标 | 2.4 <sup>+0.2</sup> | 35           | ≤1.5        | <5          | ≥70            | ≥100       | 62             |
| 测试结果 | 2.42                | 35           | 1.47        | 1           | 82.7           | 150        | 64.5           |
| 符合性  | 符合                  | 符合           | 符合          | 符合          | 符合             | 符合         | 符合             |

### 3 结论

(1)分别对PBO/D-3和PBO/D-8复合材料力学性能进行了测试,测试结果表明,D-8与PBO纤维具有较好的浸润性,可解决PBO复合材料层间性能较差的缺陷。其中,PBO HM/D-8复合材料力学性能最佳,其拉伸强度与NOL层间剪切强度分别高达1 397 MPa和20.2 MPa。

(2)采用PBO HM/D-8复合材料作为缠绕层,开展了2.4 L铝内衬高压气瓶的研制。结果表明,复合材料气瓶结构系数高达64.5 km。

#### 参考文献

[1] 张天平,刘志栋,杨福全,等.一种卫星推进系统复

合材料氦气瓶设计及验证[J].上海航天,2006(3):41-48

[2] 张天平,刘志栋,王小永,等.钛内衬碳纤维缠绕氦气瓶疲劳寿命和可靠度验证[J].中国空间科学技术,2007,2(1):41-46

[3] 谢雄军.21世纪超级纤维-PBO[J].中国个体防护设备,2002(3):21-22

[4] 侯仲军,张永胜,胡伟.PBO纤维增强树脂基复合材料SRM壳体制备技术研究[C]//中国航天第十三专业信息网2011年度学术交流会议论文集,2011:1-9

[5] 宋焕成.聚合物基复合材料[M].北京:国防工业出版社,1981:293

[6] 王百亚,杨件奎,方东红.PBO纤维及其复合材料工艺性能研究[J].宇航材料工艺,2004,34(5):15-20

(编辑 李洪泉)

(上接第57页)

(3)采用阴阳模结合的方式,用模压成型的技术完成罩形结构件的成型,其尺寸能够得到有效保证,并且罩形结构件的质量能够满足设计要求。

### 4 结论

(1)研制了水溶性芯模的制备工艺和性能特点,其制备工艺简单,各项性能能够满足复合材料结构件成型过程中的温度和压力的要求。

(2)使用水溶性芯模作为阳模,通过模压成型的工艺成功制备了开口小、内腔大、壁薄的复合材料结构件,解决了金属模具不易脱模的、形状复杂的复合材料结构件成型制造中遇到的工艺技术难题。

(3)水溶性芯模的研制对于扩大树脂基复合材料在航天器结构中的应用范围、提升航天器的研制能

力具有重大意义。

#### 参考文献

[1] 张芳,殷永霞,谭放.水溶性芯模性能和应用研究[J].航天制造技术,2012(6):53-60

[2] 全建峰,王玲,等.用于复杂形状复合材料制造的水溶性芯模材料[J].航空制造技术,2009(14):94-97

[3] Artz G J, IOMBardi J L, Vaidyanathan R, et al. Water Soluble Tooling Materials for Composite Structure[P]. U. S. Patent No. 6,828,373, Dec. ,2004

[4] 杜志龙,邱桂斌,阎小俊.新型水溶芯材料的研制[J].塑料工业,2004,32(11):55-56

[5] 高芳亮.RTM工艺用水溶性芯模材料的制备与性能[D].国防科学技术大学,2010

(编辑 李洪泉)