

DOI:10.11951/j. issn. 1005 - 0299. 20170380

# 聚酰亚胺纤维与碳纤维缠绕复合气瓶性能对比研究

林 松<sup>1</sup>, 牛鸿庆<sup>2</sup>, 李文斌<sup>3</sup>

(1. 北华航天工业学院, 河北 廊坊 065000; 2. 北京化工大学  
材料科学与工程学院, 北京 100029; 3. 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

**摘要:** 本文主要研究高性能国产聚酰亚胺纤维在复合材料气瓶上的应用, 并表征其与进口碳纤维的性能差距。采用国产聚酰亚胺纤维进行缠绕成型工艺优化与复合材料性能测试分析, 在测试数据及工艺优化基础上针对其进行了复合材料气瓶的强度设计。分别采用聚酰亚胺纤维、进口T300、T700以及T800碳纤维缠绕成型复合材料气瓶, 进行水压爆破压强的测试, 并引进声发射检测技术对其在水压过程中的损伤信号进行监测分析。结果表明聚酰亚胺纤维缠绕工艺性良好, 与树脂界面结合优异, 适用于湿法缠绕成型工艺。复合材料拉伸强度达到1 708 MPa, 纤维的强度发挥率高达80%, 相比于碳纤维复合材料其呈现出较好的断裂韧性, 有利于减少复合材料气瓶在水压下的应力损伤。缠绕成型的聚酰亚胺纤维复合材料气瓶容器特征系数(PV/W)高达32.2 km, 其在航空航天、医用、汽车、核工业等领域具有广阔的应用前景。

**关键词:** 聚酰亚胺纤维; 缠绕成型; 复合材料气瓶; 碳纤维; 爆破压强

中图分类号: V45 文献标志码: A 文章编号: 1005 - 0299(2018)06 - 0023 - 07

## Comparative study on performance of polyimide fiber and carbon fiber composite cylinders

LIN Song<sup>1</sup>, NIU Hongqing<sup>2</sup>, LI Wenbin<sup>3</sup>

(1. North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China;  
2. College of Material Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;  
3. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** This paper mainly studies the application of high performance domestic polyimide fiber in composite cylinders and characterized its performance gap with imported carbon fiber. Filament winding process verification of the domestic polyimide fiber was researched and mechanical properties of domestic polyimide fiber composite were tested. On the basis of the test data and process optimization, the strength design of the composite cylinder was carried out. The composite cylinders were fabricated respectively by using domestic polyimide fiber, imported T300, T700, and T800 carbon fibers. The burst pressure of the composite cylinders was studied by hydrostatic test. Moreover, acoustic emission testing technology was introduced to monitor the damage signals during the hydrostatic test. The results showed that domestic polyimide fiber presented good manufacturability for filament winding process and excellent bonding with resin. The tensile strength of the composite reached 1 708 MPa and the fiber strength ratio was up to 80%. Compared with carbon fiber composite, the domestic polyimide fiber composite exhibits better fracture toughness. It was beneficial to reduce the stress damage of composite cylinders under internal hydrostatic pressure. The value of PV/W to the composite cylinder, which was fabricated by domestic polyimide fibers, was up to 32.2 km. It indicates that the domestic polyimide fiber composite can be widely used in aviation, aerospace, medical, automotive, nuclear industry, and other fields.

**Keywords:** polyimide fiber; filament winding; composite cylinder; carbon fiber; burst pressure

聚酰亚胺(Polyimide, PI)纤维是一种高性能芳杂环有机纤维, 具有良好的热稳定性、优异高强

高模特性、耐绝热性能、耐紫外、低吸水率及绝缘性能<sup>[1-2]</sup>。与芳纶、超高分子量聚乙烯、石英、聚苯硫醚等纤维相比具有突出的综合应用性, 已成为当前高技术纤维的重要品种之一, 对实现航空航天飞行器轻质高强具有重大意义。

复合材料气瓶采用纤维缠绕成型, 具有较高

收稿日期: 2017-11-06 网络出版日期: 2018-12-07

作者简介: 林 松(1983—), 男, 高级工程师。

通信作者: 林 松, E-mail:linsong28@126.com

期刊网址: [http://hit.alljournals.cn/mst\\_cn/ch/index.aspx](http://hit.alljournals.cn/mst_cn/ch/index.aspx)

的结构效率,可以应用于运载火箭的增压输送系统以及燃料电池的储氢装置,一般采用高性能的碳纤维以及芳纶纤维作为增强材料<sup>[3-4]</sup>. PI 纤维由于其密度和吸水率较低、强度较高,可以应用于复合材料气瓶的缠绕成型。目前,国外还没有商品化的高强型 PI 纤维产品<sup>[5-6]</sup>,其在增强结构复合材料,特别是缠绕成型上的应用也未见报道。我国则在高强型 PI 纤维的研制方面则取得了显著进展<sup>[7-8]</sup>,推出了系列化产品,填补了市场空白,也为其在复合气瓶上的应用提供了可能。

本文采用国产高强型 PI 纤维,进行缠绕成型工艺及强度设计的研究,采用湿法工艺缠绕成型复合材料气瓶,并分别采用日本东丽 T300、T700、T800 碳纤维缠绕成型的复合材料气瓶与其进行爆破性能的对比试验,探索高强型 PI 纤维在缠绕成型航天压力容器上的应用。

## 1 实验

### 1.1 实验材料和设备

材料:缠绕树脂体系,自制;进口东丽 T300、T700、T800 碳纤维,日本东丽;聚酰亚胺纤维,江苏先诺新材料科技有限公司,纤维基本力学性能对比如表 1 所示。9L 铝合金金属内衬,北京科泰克科技有限责任公司。

表 1 纤维力学性能

Table 1 Mechanical properties of fibers

纤维类型	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	拉伸强度 /MPa	断裂延伸率 /%	弹性模量 /GPa
PI 纤维	1.44	3500	3.0	120
T300B-3K	1.76	3530	1.5	230
T700SC-12K	1.80	4900	2.1	280
T800H-12K	1.90	5490	1.9	294

设备:四轴联动缠绕机,哈工大;万能材料实验机 Instron 6025;水压爆破工装,自制;NOL 环成型模具,自制。

### 1.2 试样制备

按照 GB/T2578-1989 的方法,分别制备 PI 纤维、进口 T300、T700、T800 碳纤维的 NOL 环试样,根据经验,纤维断裂强力的 5%~10% 可为选取缠绕张力,PI 纤维与 T300 碳纤维缠绕张力选取 20 N,T700 和 T800 碳纤维缠绕张力选取 40 N。分别将纤维浸渍树脂后在缠绕张力的作用下缠绕成型于 9L 金属内衬的表面,经过固化后,制得 4 个复合材料气瓶。缠绕过程采用逐层递减的张力制度,PI 纤维与 T300 碳纤维起始张力为 20 N,每两层递减 2 N,T700 与 T800 碳纤维起始

张力为 40 N,每两层递减 2 N。缠绕过程为螺旋向和环向交替进行。

分别选取 PI 纤维、进口 T300、T700、T800 碳纤维以及制备的 NOL 环拉伸断裂的试样进行喷金处理后进行表面形貌的观察。

### 1.3 实验方法

按照 GB/T1458-2005 的方法测试 NOL 环的拉伸强度。按照 GB/T 3366-1996 的方法采用金相显微镜法对 NOL 环的纤维体积含量进行测试。按照 GB/T 6058-2005《纤维缠绕压力容器制备和内压试验方法》进行 9L 复合材料气瓶的爆破试验,记录爆破压强及失效模式。

气瓶在水压爆破前,先进行水压验证及声发射检测,PI 纤维与进口 T300 碳纤维复合材料气瓶升压至 30 MPa,T700 碳纤维与 T800 碳纤维气瓶升压至 40 MPa,保压 4 min。在此过程中,如图 1 所示在气瓶的外表面设置 4 个声发射探头,采集声发射信号,声发射信号的最低采集门槛为 60 dB。

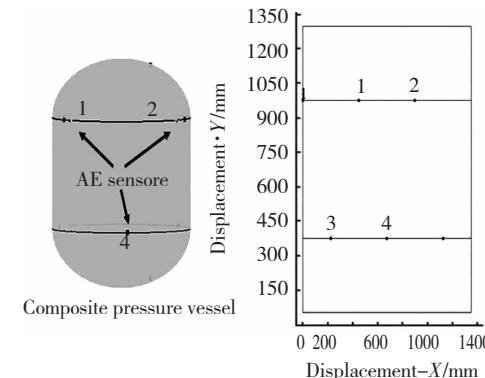


图 1 复合材料气瓶声发射检测测点位置图

Fig. 1 Location diagram of acoustic emission detection points for composite cylinders

纤维强度发挥率为计算公式如下所示:

$$\delta = \frac{F_{\text{NOL}}}{V_f \cdot F_{\text{fiber}}} \quad (1)$$

式中: $\delta$  为纤维强度发挥率,%;  $F_{\text{NOL}}$  为 NOL 环拉伸强度,MPa; $V_f$  为纤维体积含量,%;  $F_{\text{fiber}}$  为纤维复丝强度,MPa。

复合材料气瓶容器特征系数公式为

$$K = P * V/W \quad (2)$$

式中: $K$  为容器特征系数,km; $P$  为爆破压强,MPa; $V$  为气瓶容积,L; $W$  为复合材料层的重量,kg。

## 2 结果与讨论

### 2.1 缠绕树脂体系及其力学性能

本文采用的缠绕树脂体系性能如表 2 所示,

具有较高的力学性能,断裂延伸率高达5%,有利于充分发挥纤维的拉伸强度。如图2所示树脂断面形貌为清晰的鱼鳞状,可以认为此配方树脂固化后受力破坏形式为韧性破坏。此树脂配方可满足PI纤维高韧性的匹配性要求,并且有利于延缓气瓶受内压时基体树脂开裂的趋势,充分发挥纤维的强度。

表2 缠绕树脂力学性能

Table 2 Mechanical properties of filament winding resin

拉伸强度/ MPa	拉伸模量/ GPa	断裂延伸率/ %
90 ± 6.0	3 ± 0.5	5 ± 0.5

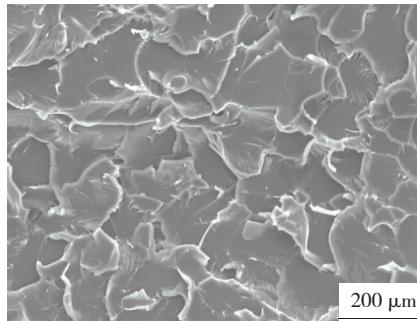


图2 树脂浇注体拉伸断面微观照片

Fig. 2 Micrograph of tensile section of resin casting

## 2.2 缠绕成型工艺及NOL环力学性能

对PI纤维进行NOL环的缠绕成型试验,如图3所示,PI纤维与T800纤维在缠绕机导纱辊上展纱较为均匀,无出现明显纤维磨损,纤维纱在退绕过程中平稳,无出现纤维纠结与干涉情况。以上工艺试验可以看出,PI纤维可以满足缠绕成型工艺要求。

从微观结构上分析,如图4所示PI纤维直径较碳纤维粗,表面形貌与T700纤维相似,较为光滑平整,与T300与T800碳纤维相比,表面沟槽数量较少。在纤维缠绕过程中,为增加复合材料的密实度对纤维施加了一定的张力,表面光滑的纤维在张力作用下经过缠绕机的各种导纱机构,不易磨损起毛<sup>[9]</sup>,可适用于缠绕成型。

采用以上高韧性缠绕树脂体系制备了PI纤维复合材料NOL环,进行拉伸性能的评价。如表3所示,PI纤维的平均拉伸强度达到1 708 MPa,纤维的强度发挥率为80%,达到日本东丽T300纤维复合材料的水平,但是PI纤维密度仅为1.44 g/cm<sup>3</sup>,与T300纤维1.76 g/cm<sup>3</sup>相比,其在结构减重上具有一定优势。但是与高强度碳纤维T700及T800相比,由于其纤维本身拉伸强度的限制,导致制备的复合材料拉伸强度较高强型纤维具有一定差距。



图3 复合材料NOL环缠绕成型工艺试验

Fig. 3 Winding process test of composite NOL rings

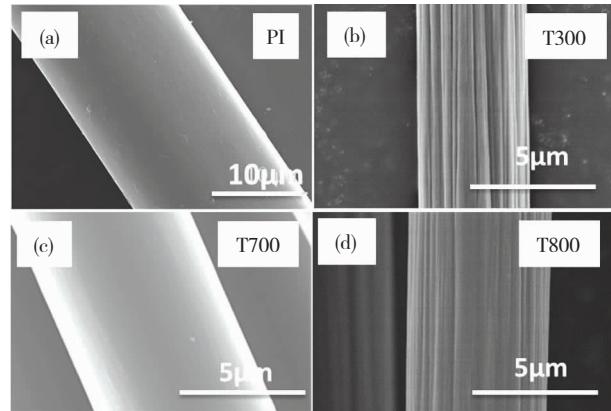


图4 纤维形貌照片

Fig. 4 Micrographs of fibers

表3 NOL环的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of NOL rings

类型	F <sub>NOL</sub> /MPa	V <sub>f</sub> /%	F <sub>fiber</sub> /MPa	δ/%
PI	1 708 ± 102	61 ± 1	3 500 ± 203	80 ± 2
T300	1 800 ± 110	60 ± 2	3 530 ± 210	85 ± 2
T700	2 400 ± 205	61 ± 2	4 900 ± 195	80 ± 1
T800	2 500 ± 215	61 ± 2	5 490 ± 230	75 ± 2

本文采用的PI纤维表面经过活化处理,如图5所示PI纤维、东丽T300、T700与T800纤维外层在破坏后均紧密包裹一层树脂,说明其与树脂基体的结合紧密。良好的界面结合状态有利于充分发挥纤维的强度优势<sup>[10]</sup>,提高复合材料气瓶的爆破压强,提高结构效率。

图6所示的为NOL环试样在拉伸过程中的载荷/变形曲线,可以明显看出,国产PI纤维由于其模量较碳纤维低,断裂延伸率高,NOL环在拉伸过程中呈现出较高的断裂韧性,这有利于吸收复合材料在破坏过程中的能量,减少应力集中,从而有利于充分发挥纤维的拉伸强度,提高复合材料的疲劳性能<sup>[11]</sup>。

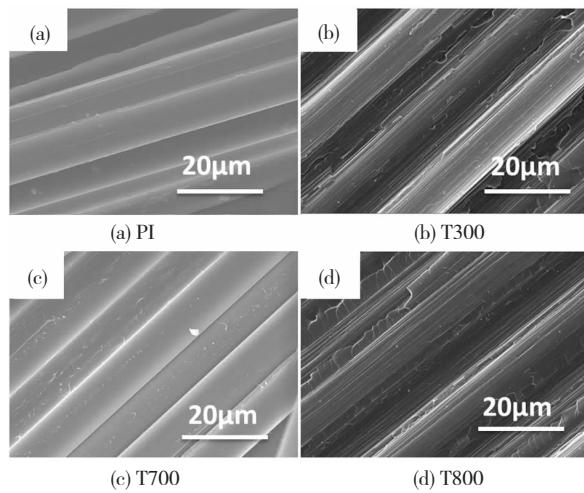


图 5 复合材料 SEM 照片

Fig. 5 Micrographs of composite materials

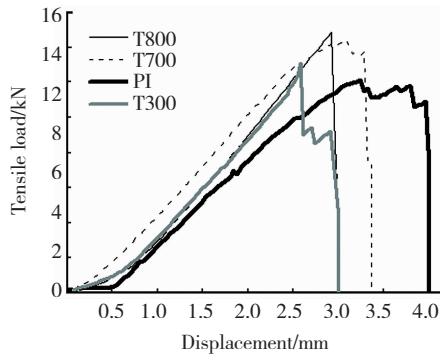


图 6 NOL 环在拉伸过程中的载荷/变形曲线

Fig. 6 Load/deformation curves of NOL rings in tension

## 2.3 复合材料气瓶的强度设计

采用网格理论对复合材料气瓶筒身段进行结构设计,纤维发挥强度是影响复合材料气瓶强度的关键因素,设计的纤维发挥强度采用表 3 所示的实测值,其他参数见表 4.

根据网格理论进行筒身段的强度设计计算<sup>[12-13]</sup>:

$$h_n = \frac{PR}{2k_s \times \sigma_f \times \cos^2 \alpha}, \quad (3)$$

$$h_{\beta} = \frac{PR}{2\sigma_f \times (2 - \tan^2 \alpha)}. \quad (4)$$

式中:  $h_n$ 、 $h_{\beta}$  为分别为纵向、环向复合材料层厚度, mm;  $k_s$  为应力平衡系数, 取 0.80;  $\alpha$  为缠绕角;  $P$  为设计爆破压强, MPa;  $R$  为筒体半径, mm;  $\sigma$  为纤维发挥强度, MPa. 纤维缠绕角根据式 (5) 计算.

$$\alpha = \arcsin(r/R). \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  为纤维缠绕角;  $r$  为极孔半径, mm;  $R$  为筒身段直径, mm.

缠绕采用螺旋向缠绕加环向缠绕的方式, 螺

旋向缠绕采用逐渐扩孔缠绕方式, 避免纤维在封头位置的堆积, 并保证封头位置的强度. 缠绕极孔半径在 17、30、80、100 mm 时, 缠绕角分别为 12°、21°、25°、32°. 环向缠绕角为 89.8°.

表 4 复合材料气瓶的计算参数

Table 4 Calculation parameters of composite cylinders

序号	名称	数值
1	气瓶直径 $R$ /mm	165
2	筒身段长度 $l$ /mm	400
3	椭圆形封头短半轴长度/mm	60
4	气瓶管口直径/mm	20
5	设计纤维体积含量/%	65
8	纤维单层厚度/mm	0.17
9	复合材料单层厚度/mm	0.26
10	纤维发挥强度	见表 3

筒身段强度复算如下.

筒身段纵向爆破压强:

$$P_{\text{纵向}} = \sum \frac{2 \times k_s \times \sigma_{fx} \times h_{f1} \times \cos^2 \alpha_1}{R}. \quad (6)$$

筒身段环向爆破压强:

$$P_{\text{环向}} = \sum \frac{2 \times \sigma_{fx} \times h_{f2}}{R \times (2 - \tan^2 \alpha_i)}. \quad (7)$$

复合材料气瓶筒身段强度复算见表 5.

表 5 复合材料气瓶的设计铺层及爆破压强

Table 5 Design, ply and burst pressure of composite cylinder

缠绕角度及层数	设计爆破压强/MPa								
	12°	21°	25°	32°	90°	PI	T300	T700	T800
4	4	4	4	4	18	52	56	73	77

根据以上设计的缠绕角, 采用 CADWIND 缠绕软件进行缠绕线型的设计, 在缠绕过程中保证 PI 纤维与树脂充分浸渍, 缠绕张力波动不宜超过  $\pm 10\%$ , 并且必须尽量避免纤维在缠绕过程中的磨损.

## 2.4 复合材料气瓶的水压实验

本文采用声发射的研究方法对复合材料气瓶在水压试验过程中的损伤信号进行了检测. 对于纤维增强的复合材料, 一般认为声发射采集到的 80dB 以上的信号与纤维断裂相关, 其余的信号主要为树脂基体开裂以及复合材料层间裂纹扩展导致<sup>[14-15]</sup>.

如图 7 所示, PI 纤维缠绕成型的复合材料气瓶声发射的信号数量明显少于 T300、T700 以及 T800 纤维缠绕成型的气瓶, 这主要是由于 PI 纤维的断裂延伸率较高, 缠绕成型复合材料的韧性

较好,在受力过程中更能充分发挥纤维的强度优势,减少复合材料层的裂纹扩展以及高幅度值信号的产生。为了进一步表征复合材料气瓶的性能,进行水压爆破试验,结果如图8所示,4种不同纤维缠绕成型的复合材料实测爆破压强与设计爆破压强较为接近,并且稍低于设计值。这主要是由于实际成型过程中可能存在一些设计无法考虑到的因素,导致最终复合材料气瓶爆破压强较设计值有所下降。

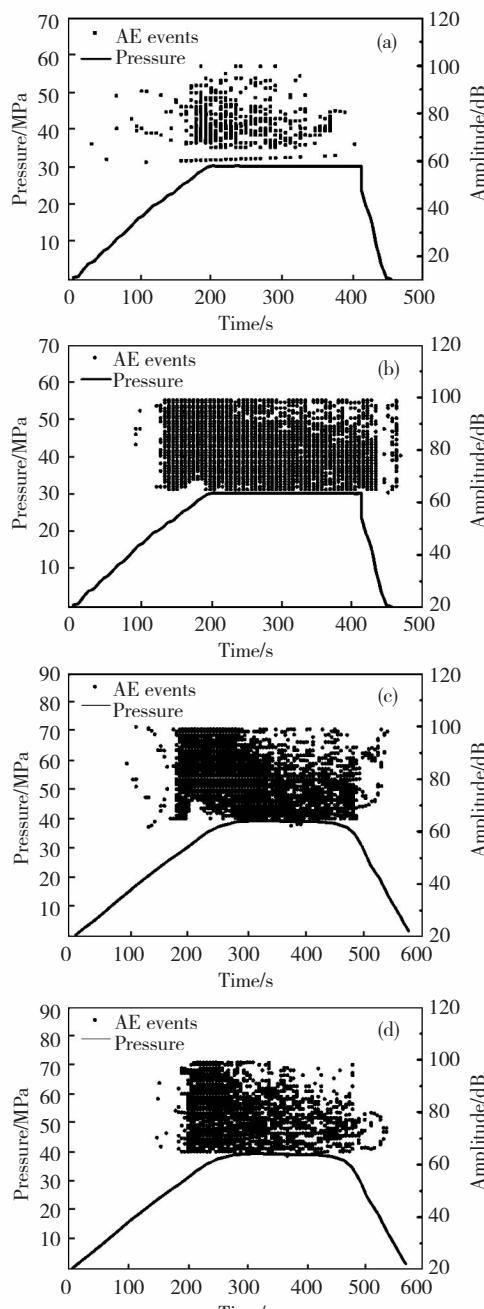


图7 不同纤维缠绕成型复合材料气瓶声发射信号图:  
(a) PI;(b) T300;(c) T700;(d) T800

Fig. 7 Acoustic emission signals of different filament winding composite cylinders: (a) PI; (b) T300; (c) T700; (d) T800

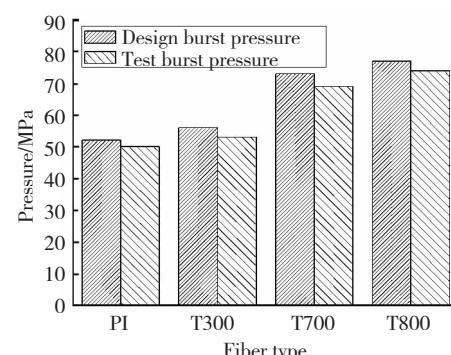


图8 复合材料气瓶爆破压强

Fig. 8 Burst pressure of composite cylinders

纤维发挥强度是影响复合材料气瓶爆破压强的关键因素,根据式(6)及式(7)以及复合材料气瓶的爆破压强反推纤维的发挥强度,如式(8)与(9)所示。

$$\sigma_{f\text{纵向}} = \frac{P_{\text{爆破压强}} \times R}{\sum 2 \times k_s \times h_{f1i} \times \cos^2 \alpha_i}. \quad (8)$$

$$\sigma_{f\text{环向}} = \frac{P_{\text{爆破压强}} \times \sum R \times (2 - \tan^2 \alpha_i)}{2 \times h_{f2i}}. \quad (9)$$

通过爆破压强反推纤维的发挥强度,如表6所示,PI纤维为2770 MPa,低于设计值2800 MPa,这是造成设计爆破压强与实际爆破压强差异的主要原因,PI纤维强度发挥率高达82%,但与进口碳纤维相比PI纤维的发挥强度具有一定的差距。

表6 复合材料气瓶的性能参数

Table 6 Performance parameters of composite cylinders

纤维种类	纤维发挥强度/MPa	纤维强度/MPa	纤维强度发挥率/%	容器特征系数/km
PI	2770	3500 ± 203	82%	32.2
T300	2912	3530 ± 210	82.5%	29.2
T700	4200	4900 ± 195	85.7%	38.7
T800	4282	5490 ± 230	78%	39.2

容器特征系数(PV/W)是衡量复合材料气瓶性能优越的参数之一,也是航天器复合材料气瓶设计的主要特性<sup>[16]</sup>。容器特征系数的高低可决定复合材料气瓶质量的好坏,具有较高性能因子的复合材料气瓶通过薄壁内衬与高强度碳纤维/环氧树脂的结合既大大减轻了整体重量,同时又提升了产品性能<sup>[17]</sup>。如表6所示,PI纤维复合材料气瓶的容器性能因子达到32.2 km,超过进口T300水平。这主要是由于PI纤维强度与进口T300纤维相当,但是其密度较低,本文通过工艺、纤维与树脂的匹配,使得PI纤维的强度发挥率达到进口纤维的水平,从而使得容器特征系数超过T300水平。但是由于本身PI纤维的强度与东丽

进口 T700 与 T800 碳纤维具有一定的差距,其值低于 T700 与 T800 缠绕成型的复合材料气瓶。通过 PI 纤维拉伸强度继续提升,可以进一步提高复合材料气瓶的容器特征系数。

复合材料气瓶的爆破模式如图 9,均为筒身段沿着环向及纵向同时破坏,气瓶破坏的较为彻底,从破坏模式上看,内压过程中冲击能量较大。表明 PI 纤维缠绕成型的复合材料气瓶与碳纤维复合材料气瓶相似,可以达到较好的爆破失效模式。



图 9 气瓶的爆破模式

Fig. 9 Explosion modes of composite cylinders

### 3 结 论

采用国产高强型 PI 纤维进行缠绕成型工艺验证,针对其进行了复合材料气瓶的强度设计,最后分别采用 PI 纤维、进口 T300、T700 以及 T800 碳纤维缠绕成型复合材料气瓶,进行水压爆破性能的对比研究,主要结论如下:

1) PI 纤维适用于缠绕成型工艺,NOL 环的测试结果表明,PI 纤维与树脂结合紧密,并且与进口 T300、T700 与 T800 复合材料相比,在拉伸过程中呈现较好的断裂韧性,其强度发挥率可达 80%,可用于复合材料气瓶的缠绕成型。

2) 声发射监测的结果表明,PI 纤维增强复合材料气瓶在承受内压过程中,声发射的信号数量明显少于 T300、T700 以及 T800 纤维缠绕成型的气瓶,表明其在受力过程中能充分发挥纤维的强度,减少复合材料层的裂纹扩展,提高复合材料气瓶的性能。

3) 采用 PI 纤维缠绕成型的复合材料气瓶容器特征系数可达到 32.2 km,优于 T300 碳纤维气瓶,与 T700 和 T800 碳纤维气瓶相比具有一定差距。

### 参 考 文 献 :

- [1] DONG J, FANG Y, GAN F, et al. Enhanced mechanical properties of polyimide composite fibers containing amino functionalized carbon nanotubes [J]. Composites Science & Technology, 2016, 135: 137 – 145.  
DOI:10.1016/j.compscitech.2016.09.021
- [2] YI X, GAO Y, ZHANG M, et al. Tensile modulus enhancement and mechanism of polyimide fibers by post-thermal treatment induced microvoid evolution [J]. European Polymer Journal, 2017, 91:232 – 241.  
DOI:10.1016/j.eurpolymj.2017.03.063
- [3] 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, LANG 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.
- [4] 贺莉,尹术帮,杨杰,等.芳纶Ⅲ纤维湿法缠绕工艺研究[J].玻璃钢/复合材料, 2014(8):77 – 82.  
HE Li, YIN Shubang, YANG Jie, et al. Study on wet process formula for aramid Ⅲ fibers [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(8):77 – 82.  
DOI:10.3969/j.issn.1003-0999.2014.08.015
- [5] NIU H, QI S, HAN E, et al. Fabrication of high-performance copolyimide fibers from 3, 3', 4, 4' - biphenyltetracarboxylic dianhydride, p-phenylenediamine and 2-(4-aminophenyl)-6-amino-4(3H)-quinazolinone[J]. Materials Letters, 2012, 89(10): 63 – 65.  
DOI:10.1016/j.matlet.2012.08.088
- [6] CHANG J, GE Q, ZHANG M, et al. Effect of pre-imidization on the structures and properties of polyimide fibers [J]. Rsc Advances, 2015, 5 (85): 69555 – 69566.  
DOI:10.1039/c5ra10943d
- [7] 朱晓光,陈鄂生,张美云.聚酰亚胺纤维及其纸基功能材料研究进展[J].中国造纸,2016,35(10):59 – 65.  
ZHU Xiaoguang, CHEN Esheng, ZHANG Meiyun. The research progress of polyimide fiber and its paper base material [J]. China Pulp & Paper, 2016, 35 (10):59 – 65.  
DOI: 10.11980/j.issn.0254-508X.2016.10.013
- [8] 常晶菁,牛鸿庆,武德珍.聚酰亚胺纤维的研究进展[J].高分子通报, 2017(3):19 – 27.  
CHANG Jingjing, NIU Hongqing, WU Dezhen.

- Research progress of polyimide fibers [J]. Chinese Polymer Bulletin , 2017(3):19 – 27.  
DOI: 10.14028/j.cnki.1003 - 3726.2017.03.003
- [9] 王洋, 刘洪新, 陈维强, 等. 高模量碳纤维复合材料薄壁管件成型工艺优化研究[J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(2):56 – 59.  
WANG Yang , LIU Hongxin, CHEN Weiqiang, et al. Optimization of forming process of high modulus carbon fiber reinforced composite thin-wall cylindrical tube [J]. Aerospace Materials & Technology, 2017, 47 (2):56 – 59.  
DOI: 10.12044/j. issn. 1007 - 2330.2017.02.013
- [10] 何晓东, 史耀耀, 赵鹏兵. 复合材料布带缠绕成型压力控制技术[J]. 航空学报, 2014, 35 (3):868 – 877.  
HE Xiaodong, SHI Yaoyao, ZHAO Pengbing. Control technology of composite tape winding pressure [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2014, 35 (3):868 – 877.  
DOI: 10.7527/S1000 - 6893.2013.0417
- [11] 王 斌, 丘哲明, 刘爱华, 等. 高性能 PBO 纤维复合材料成型工艺参数研究[J]. 航空学报, 2004, 25(2):192 – 196.  
WANG Bin, QIU Zheming, LIU Aihua, et al. Study of manufacture processing parameter of high-performance PBO fiber composite [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2004, 25(2):192 – 196.  
DOI: 10.3321/j. issn:1000 - 6893.2004.02.023
- [12] 陈汝训. 复合材料天然气气瓶设计的几个问题 [J]. 宇航材料工艺, 2001, 31(5):55 – 57.  
CHEN Ruxun. Some problems with natural gas composite cylinder design [J]. Aerospace Materials & Technology, 2001, 31(5):55 – 57.  
DOI: 10.3969/j. issn.1007 - 2330.2001.05.013
- [13] 陈汝训. 纤维缠绕壳体的应力平衡系数和圆筒缠绕角[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(6):677 – 679.  
CHEN Ruxun. Stress equilibrium factor and the cylinder wound angle of the filament-wound case [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2009, 32(6):677 – 679.  
DOI: 10.3969/j. issn. 1006 - 2793.2009.06.019
- [14] 王 飞, 周建平, 涂俊, 等. 纤维缠绕复合材料气瓶声发射检测技术研究[J]. 航天制造技术, 2014 (3):59 – 63.  
WANG Fei, ZHOU Jianping, TU Jun, et al. Acoustic emission testing of filament-wound composite gas cylinders [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014(3):59 – 63.  
DOI: 10.3969/j. issn. 1001 - 4837.2014.11.004
- [15] 刘哲军, 葛 丽, 王俊峰, 等. 复合材料气瓶声发射检测初步研究 [J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(2):120 – 123.  
LIU Zhejun, GE Li, WANG Junfeng. Acoustic emission testing of composite pressure vessels [J]. Aerospace Materials & Technology, 2011, 41(2):120 – 123.  
DOI: 10.3969/j. issn. 1007 - 2330.2011.02.031
- [16] 王百亚, 张康助, 雷海锋, 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, ZHAN Kangzhu, LEI Haifeng, et al. Study of manufacturing process for F - 12 fiber/RE 14 composite pressure vessels [J]. Aerospace Materials & Technology, 2003, 33(4):39 – 42.  
DOI: 10.3969/j. issn. 1007 - 2330.2003.04.009
- [17] 李玉峰, 李玲丽, 潘宗友. 一种卫星用钛内衬 - 碳纤维缠绕复合材料气瓶特性研究[J]. 宇航学报, 2014, 35(11):1318 – 1325.  
LI Yufeng, LI Lingli, PAN Zongyou. Characteristic study on titanium-liner/carbon-fiber overwrapped vessels on the satellite [J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(11):1318 – 1325.  
DOI: 10.3873/j. issn. 1000 - 1328.2014.11.014

(编辑 张积宾)

## 本文引用格式:

- 林 松,牛鸿庆,李文斌.聚酰亚胺纤维与碳纤维缠绕复合气瓶性能对比研究[J].材料科学与工艺,2018,26(6):23 – 29. DOI:10.11951/j. issn. 1005 - 0299.20150101  
Lin Song,Niu Hongqing,Li Wenbin. Comparative study on performance of polyimide fiber and carbon fiber composite cylinders [J]. Materials Science and Technology,2018,26(6):23 – 29. DOI:10.11951/j. issn. 1005 - 0299.20150101