

F-3A/E 与 F-12/E 复合材料圆管轴压性能对比

张 阳 程 文 王 斌 王百亚 刘建超

(西安航天复合材料研究所,西安 710025)

文 摘 采用缠绕成型的方法制备了 F-3A/E 复合材料薄壁圆管,通过对比试验研究了树脂配方和增强纤维对管件轴压性能的影响,并对缠绕管件的轴压破坏模式进行研究。同时与 F-12/E 复合材料进行了对比分析。结果表明:(1)TH-1 配方适合 F-3A 纤维制备复合材料;(2)F-3A/E 复合材料缠绕管件轴压承载力比 F-12/E 复合材料管件的高 16.5%~23.9%,且轴压性能具有良好的稳定性;(3)F-3A/E 管件轴压破坏形式表现为脆性破坏,而 F-12/E 管件轴压则表现为韧性破坏模式。

关键词 复合材料,缠绕成型,轴压

Axial Compressive Properties of The F-3A/E and F-12/E Composite Tube

Zhang Yang Cheng Wen Wang Bin Wang Baiya Liu Jianchao

(Xi'an Aerospace Composites Research Institute, Xi'an 710025)

Abstract Filament winding process is used to fabricate the F-3A composite tubes, and the effect of resin formula and reinforced fiber on axial compression property as well as the failure mode of composite tubes was studied. The results reveal that (1) The TH-1 resin formula shows excellent compatibility for the F-3A fiber composite, (2) The axial compressive strength of domestic F-3A fiber composite tube is higher than F-12 composite tube up to 16.5% to 23.9% and higher stability, (3) The failure mode of domestic F-3A fiber composite tube appears brittleness while F-12 fiber composite tube shows toughness.

Key words Composite, Filament winding, Axial compressive

0 引言

芳纶纤维复合材料以其轻质高强、工艺性好等突出特性成为国内外战略导弹发动机壳体的主体材料。近年,中蓝集团晨光化工研究院有限公司和西安航天复合材料研究所联合开展国产芳纶 III A 纤维(F-3A)研制及其复合材料工程化应用研究,目前该种纤维复丝拉伸强度达到 4.4 GPa,拉伸模量>145 GPa,断裂伸长率>2.5%,综合性能超过 APMOC 纤维。在开展芳纶复合材料工程研究过程中用了 $\Phi 200$ mm 缩比构件复合材料结构轴压承载性能进行表征,但是 $\Phi 200$ mm 带裙轴压试验件制备工艺繁杂,导致轴压试验数据的波动较大。为了对应用于轴压构件的 F-3A 纤维复合材料轴压性能进行有效评价,本文通过缠绕方法研制了圆筒形复合材料管件,开展 F-3A 纤维复合材料轴压性能研究。

1 实验

1.1 原材料和设备

刚性树脂配方(TD-1),韧性树脂配方(TI-3),刚-韧性配方(TH-1),4304 配方,均为自制(表 1)。

表 1 树脂配方浇注体性能

Tab. 1 Properties of resin formula casting body

配方	拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	断裂伸长率/%	弯曲强度/MPa	弯曲模量/GPa	压缩强度/MPa	压缩模量/GPa
4304	76.8	3.46	2.7	105	3.55	172	3.71
TD-1	94.9	3.94	3.5	166	4.35	196	4.29
TI-3	101	3.52	5.5	157	3.65	215	3.32
TH-1	104	3.73	4.7	171	3.54	181	3.47

F-3A 纤维: $\sigma \geq 4.4$ GPa, $E \geq 145$ GPa,中蓝晨光化工研究院;F-12 纤维: $\sigma \geq 4.2$ GPa, $E \geq 125$ GPa,俄罗斯进口;四维缠绕机,自制;万能试验机:Instron 8803,美国英斯特朗公司。

1.2 试样制备

收稿日期:2013-02-27;修回日期:2013-10-18

作者简介:张阳,1982 年出生,工程师,主要从事高性能树脂基复合材料研究。E-mail:zhangyang1013@163.com

以直径 60 mm,长度 1 000 mm 的钢模作为芯轴,研制缠绕了 F-12/4304、F-3A/TD-1、F-3A/T1-3 和 F-3A/TH-1 体系的轴压管件。缠绕成型制备轴压管件试样两端补强,对试样端面打磨平整,端面与轴线垂直。

1.3 轴压试验要求

轴压测试时试样数 ≤ 5 个,安放试样时要求其轴

线与试验机上、下压板中心对准;试样加载速度:5 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 不同树脂配方对管件轴压性能的影响

首次研制的轴压管件端头补强层厚度为 1.5 mm,轴压性能测试数据见表 2,试验破坏见图 1。

表 2 不同配方案件轴压试验结果

Tab.2 Axial compressive test results of different resin formula composite tube

试样编号	F-3A/TD-1/kN	破坏形式	F-3A/T1-3/kN	破坏形式	F-3A/TH-1/kN	破坏形式
1 [#]	72.1	有效筒段破坏	74.09	端头破坏	74.92	有效筒段破坏
2 [#]	65.04	未完全破坏	74.98	有效筒段破坏	76.31	有效筒段破坏
3 [#]	71.33	有效筒段破坏	73.02	端头破坏	74.36	端头破坏
4 [#]	70.54	筒段破坏	69.31	端头微破坏	76.87	有效筒段破坏
5 [#]	64.65	端头破坏	72.93	端头破坏	74.97	有效筒段破坏
6 [#]	72.08	有效筒段破坏	73.95	补强段内局部破坏	67.61	端头微破坏
7 [#]	67.07	端头微破坏	65.10	端头破坏		
8 [#]	69.68	端头微破坏	73.84	有效筒段破坏		
\bar{X}	69.06		72.15		74.17	
$C_v/\%$	2.86		3.10		3.06	



(a) 正常筒段破坏



(b) 端头劈裂

图 1 轴压试样破坏形貌

Fig.1 Damage morphologies of axial compressive tube sample

3 个配方轴压管件的研制,测试过程及结果可以看出:采用 TH-1 配方研制管件轴压性能及稳定性要优于 TD-1 配方和 T1-3 配方。TD-1 配方中的多官能团环氧组分在固化剂作用下高交联密度赋予配方

较高刚性,破坏时表现为脆响破坏,试样中间段表面呈现环向不连续劈裂。T1-3 配方中的韧性环氧组分赋予树脂基体良好的韧性。在本文中,缠绕圆管的破坏方式表现为筒段压溃开裂失稳破坏和端头层间开裂破坏。端头破坏试样内表面部分纵向分层劈裂,这可能是由于端头的补强层厚度太薄导致传递承载稳定性不足。

2.2 F-3A 纤维和 F-12 纤维管件轴压性能对比

杜刚等^[5]研究表明端部加强能减小圆管的径向变形,能够更好地传递载荷从而有助于压缩强度的提高,而且对轴压破坏模式和破坏位置都有显著影响。试验将管件端头补强层加厚至 3 mm。在同工况下研制管件 F-12/4304、F-3A/4304 和 F-3A/TH-1 管件,并对管件轴压性能进行对比研究,管件轴压破坏前后表现形貌如图 2 所示。测试结果如表 3 所示。此外,为考核轴压管件的性能重复稳定性,进行了 F-12/TH-1 和 F-3A/TH-1 体系轴压试验,性能如表 4 所示。

从表 2 可以看出:轴压管件平均轴压承载强度达到 105 kN,且破坏位置均发生在筒段中部。对同种树脂配方不同纤维体系来说,F-3A 纤维/4304 体系的复合材料轴压管件平均载荷比 F-12/4304 体系高 16.4 kN,达到 16.5%。F-3A/TH-1 的轴压性能要略高于 F-3A/4304 体系。从表 3 可以看出:以 TH-1 配方为基体,采用 F-3A 纤维研制的管件轴压强度要比 F-12 纤维管件轴压高 23.43 kN,高出 23.9%。在同批次内轴

压性能具有良好的性能稳定性。从缠绕管件破坏形貌看,F-3A 纤维管件破坏形式为筒段环向不连续裂纹,而 F-12 纤维管件表现为筒段不连续屈曲塌陷,不同配方对于管件破坏形貌无明显的影响。



(a) F-12/4304 管件



(b) F-3A/4304 管件



(c) F-3A/TH-1 管件

图 2 轴压试验前后试样形貌

Fig. 2 Damage morphologies of axial compressive tube sample

表 3 第二次管件轴压试验性能¹⁾

Tab. 3 The second axial compressive properties of composite tube

	F-12/4304 /kN	F-3A/4304 /kN	F-3A/TH-1 /kN	破坏 形式
\bar{X}	88.79	105.19	106.36	均为筒段
$C_v/\%$	3.81	0.93	1.12	有效破坏

注:1)以上数据均为每组 8 个试样测试平均值。

表 4 第三次管件轴压试验性能

Tab. 4 The third axial compressive properties of composite tube

	F-12/TH-1 /kN	(F-3A/TH-1) -1/kN	(F-3A/TH-1) -2/kN	破坏 形式
\bar{X}	77.93	102.68	102.34	均为筒段
$C_v/\%$	2.21	0.93	1.14	有效破坏

2.3 管件轴压破坏模式分析

通过对不同体系管件的破坏形貌及轴压加载曲线进行对比,进而分析缠绕管件轴压试验破坏模式。管件破坏形貌如图 3 所示,F-12 纤维管件和 F-3A 纤维管件的轴压载荷—位移曲线如图 4 所示。



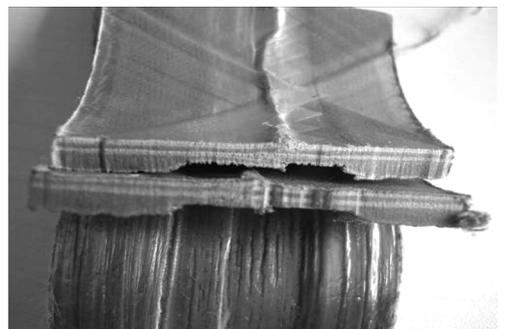
(a) F-3A 纤维轴压试样内表面



(b) F-12 纤维轴压试样内表面



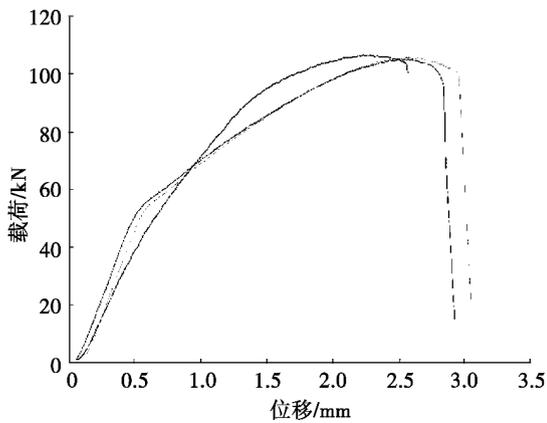
(c) F-3A 纤维轴压试样解剖形貌



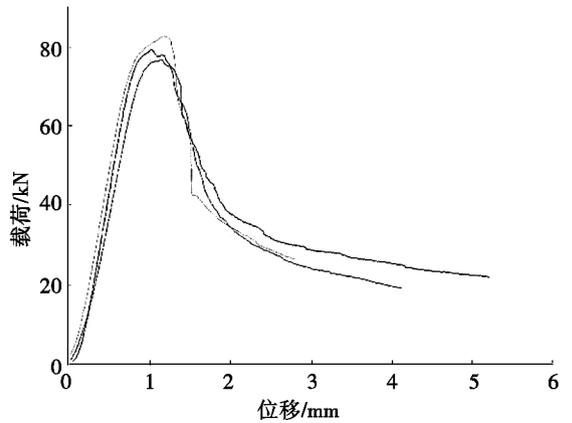
(d) F-3A 纤维轴压试样解剖面形貌

图 3 轴压试验破坏后形貌

Fig. 3 Damage morphologies of axial compressive tube sample



(a) F-3A 纤维管件



(b) F-12 纤维管件

图4 管件轴压破坏位移—载荷曲线

Fig.4 Load-displacement curve of axial compressive test

结合图1~图3对缠绕管件的破坏模式进行分析,F-3A纤维轴压试样破坏表现脆性破坏,试样外表面为不连续裂纹,试样内表面较为平缓的屈曲凸起;F-12纤维表现为韧性破坏,试样外表面表现为不连续的塌陷屈曲,而内表面表现为明显的环向内层屈曲凸起。结合图4中载荷—位移加载曲线,F-12纤维/环氧管件加载曲线具备明显的线弹性特征,表现为假塑性失稳破坏,说明管件具备较高的韧性;F-3A纤维/环氧管件加载曲线表现为非线性弹性特征,表现脆性失稳。管件的破坏形貌和轴压加载曲线分析表明,F-3A纤维管件轴向承载力要明显高于F-12纤维管件,主要是由于F-3A纤维的模量和强度均要高于F-12纤维,F-3A纤维较高的力学特性赋予管件相对较高刚度,但是管件破坏模式的差异还可能和纤维本身结构特性存在一定的关系。

3 结论

(1)刚-韧兼备的TH-1配方适用于制备F-3A纤维缠绕复合材料,采用3mm厚端头补强的F-3A纤维缠绕管件具备较好的轴压稳定性。

(2)F-3A纤维缠绕管件轴压承载力要比F-12

纤维管件平均要高16.5%~23.9%,表明F-3A纤维/TH-1树脂配方体系可以于制备较高承载抗压复合材料构件。

(3)F-3A纤维管件轴压为脆性破坏,而F-12纤维管件轴压破坏显示相对的韧性。

参考文献

- [1] 李媛,利凤翔. 复合材料壳体轴压稳定性研究[J]. 固体火箭技术,2004,27(4):280-283
- [2] 彭超义,菊苏. 缠绕角度对碳/环氧厚壁管件轴压性能影响的实验研究[J]. 宇航材料工艺,2006,36(1):27-30
- [3] 陈汝训. 复合材料轴压稳定性[J]. 固体火箭技术,2001(1):13-15
- [4] 王明鉴. 混杂纤维复合材料壳体承外载试验[J]. 推进技术,2005,26(1):93-96
- [5] 杜刚,曾竟成. 复合材料圆管端部加强对其轴压性能影响的实验分析[J]. 材料科学与工程学报,2007,25(30):457-459
- [6] 张立玲,林逸. 不同材料薄壁圆管准静态轴压变形特性[J]. 塑性工程学报,2010,17(4):62-65

(编辑 吴坚)