

多层结构复合材料薄壁圆管轴向拉伸性能研究

张冬冬 王海燕 沈伟 饶聪 谢宇辉

(核工业第八研究所,上海 201800)

摘要 考察了一种由湿法缠绕工艺制备的碳纤维薄壁圆管的轴向拉伸性能。该圆管由高模碳纤维螺旋缠绕层和高强碳纤维环向缠绕层构成。采用结构分解的方法,分别测试了每种铺层结构复合材料的轴向拉伸性能,再对由这两种铺层结构组成的碳筒整体进行轴向拉伸测试,结合两种单一铺层结构复合材料的性能对圆筒轴向拉伸的失效模式进行了分析。实验结果显示,该种结构圆筒复合材料轴向拉伸时,环向层复合材料首先发生破坏,其轴向拉伸模量主要取决于螺旋层碳纤维复合材料的轴向模量。对环向缠绕层分别采用两种不同碳纤维S和Z的圆筒进行了轴向拉伸性能测试,得到两者的轴向拉伸强度分别约为470MPa和600MPa,模量均约为90GPa。

关键词 薄壁碳筒,多层结构,轴向拉伸性能

中图分类号 TB332

文献标识码 A

文章编号:1006-3536(2021)05-0150-04

DOI:10.19817/j.cnki.issn 1006-3536.2021.05.034

Research on the axial direction mechanical property of carbon fiber composite cylinder with multilayer structure

Zhang Dongdong Wang Haiyan Shen Wei Rao Cong Xie Yuhui

(Eighth Research Institute of Nuclear Industry, Shanghai 201800)

Abstract The axial direction mechanical properties of the FW composite cylinders with different CFRP layers were researched. The structure decomposition method was used, while the composite cylinders with only circular layers and only angle-ply layers were tested respectively. The axial direction mechanical properties of composite cylinders with both of these two kinds of layers structure were tested. The test result of composites with single layers and the failure mode were analyzed, and the rationality of the method with small pipe sample model was proved. It was showed that the axial tensile strength of the rotor composites was determined by the adhesive strength of carbon fiber composites of circular layers, and the axial modulus was determined by the carbon fibers composites of spiral layers. The axial direction mechanical properties of rotor composites made of carbon fiber S and Z were tested respectively. The axial tensile strength of the rotor composites was: 470MPa and 600MPa respectively, the modulus of them were all about 90GPa.

Key words FW composite cylinder, multilayer structure, axial direction mechanical property

近年来,高性能碳纤维增强树脂基复合材料因为具有比强度高、比模量高、可设计性强等性能,逐渐成为航空、航天、储能等高端领域应用的重要结构材料^[1-2]。其中湿法缠绕成型作为一种自动化程度较高、缠绕效率突出的纤维增强树脂基复合材料制备工艺,被广泛应用于缠绕筒体等回旋体结构材料的制备^[3]。为了满足构件的力学性能,除了要选择相应强度和模量的碳纤维外,缠绕铺层的设计也非常重要^[4-5]。例如,温卫东等^[6]对单一铺层结构纤维

缠绕圆管复合材料的轴向拉伸失效模式进行了有限元分析。

本研究采用的薄壁圆筒复合材料,总厚度不到2mm,其筒体内层由高模碳纤维小角度螺旋缠绕制备,外层由高强碳纤维环向缠绕而成。对于这种铺层角度和纤维种类都不同的多层结构薄壁圆筒复合材料,其轴向拉伸性能的研究鲜有报道。本研究通过对多种铺层结构进行单一铺层结构分解,分别对只含螺旋层和环向层结构的圆筒轴向拉伸性能进行

收稿日期:2020-01-28;修回日期:2021-02-23

基金项目:国家重点研发计划“智能电网技术与装备”重点专项(2018YFB0905500)

作者简介:张冬冬(1985-),男,硕士研究生,主要从事碳纤维及其复合材料性能的研究,E-mail:409192847@qq.com。

了测试,并结合单一铺层结构复合材料的性能,对多层结构复合材料薄壁碳筒轴向拉伸过程的失效模式进行了分析。最后对螺旋层材料不变,环向层分别采用两种不同牌号碳纤维的薄壁圆筒进行了轴向拉伸性能测试,发现该多层结构复合材料轴向失效主要取决于环向层复合材料的轴向拉伸力学性能。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

制备复合材料采用的胶液均为环氧树脂 X 配方,采用的碳纤维材料共 3 种,其中螺旋层复合材料使用的纤维为高模纤维 M,环向层复合材料分别使用了 2 种高强碳纤维 S 和 Z。这些碳纤维复丝拉伸力学性能如表 1 所示,表中给出的数据为实测均值。由表 1 中数据可以看出,两种高强碳纤维 S、Z 的复丝拉伸强度比较接近,均约 5000MPa,但碳纤维 Z 的模量比 S 高约 8%。高模碳纤维 M 的模量为 374GPa,约为上述两种高强碳纤维模量的 1.5 倍。

表 1 几种碳纤维复丝的力学性能

纤维编号	强度/MPa	模量/GPa	延伸率/%
S	4979	237	2.11
Z	4953	258	1.91
M	4324	374	1.16

电子万能拉力机 (DDL300 型,最大量程 300kN,精度为 1%),长春机械研究院有限公司;静态数据采集仪 (TDS-530 型),日本东京测器研究所;电阻应变片 (TML BFLA-5-8),日本东京测器研究所。

1.2 性能测试

本研究采用的筒体复合材料,是由高模碳纤维小角度螺旋缠绕的螺旋层内层和高强碳纤维经环向缠绕而成的环向层外层复合而成。将其螺旋层结构和环向层结构单独进行测试,考察这两种不同铺层结构圆筒复合材料的轴向拉伸力学性能,测试方法主要参考标准 GB/T 5349—2005。

2 结果与讨论

2.1 单一结构圆筒轴向拉伸性能分析

2.1.1 环向层

使用两种不同牌号的高强碳纤维 S 和 Z 按照纯环向缠绕工艺制备圆筒试样,测得轴向拉伸性能结果及应力-应变曲线分别如表 2 和图 1 所示。由表 2 中的测试数据可以看出,两种高强碳纤维 S 和

Z 的圆筒轴向拉伸断裂强度分别为 44MPa 和 67MPa;轴向拉伸模量基本相当,分别为 9.5GPa 和 9.8GPa。由图 1 知,纯环向层圆筒在受轴向拉伸载荷时,其应力与应变呈良好的线性关系,并由此得到两种高强碳纤维 S、Z 纯环向缠绕圆筒的轴向拉伸断裂应变分别为 0.5% 和 0.7%。

表 2 纯环向层圆筒轴向拉伸性能

纤维编号	强度/MPa	模量/GPa	断裂应变/%
S	44	9.5	0.5
Z	67	9.8	0.7

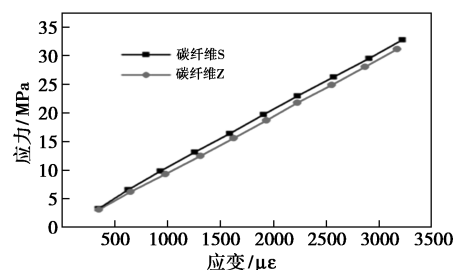


图 1 环向层圆筒轴向拉伸应力-应变曲线

2.1.2 螺旋层

使用高模碳纤维 M 按照螺旋层缠绕工艺制备得到纯螺旋层圆筒试样,测得其轴向拉伸性能和应力-应变曲线分别如表 3 和图 2 所示。

表 3 纯螺旋层圆筒轴向拉伸性能

样品编号	强度/MPa	模量/GPa
1#	1615	165.6
2#	1497	178.8
3#	1544	166.8
4#	1604	170.9
均值	1565	170.5
离散系数/%	3.52	3.50

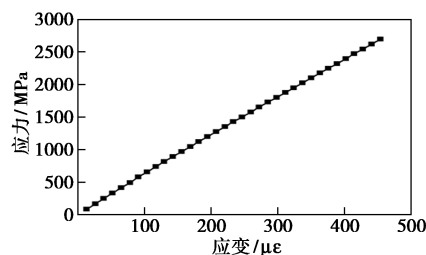


图 2 纯螺旋层圆筒的轴向拉伸应力-应变曲线

由表 3 可知,纯螺旋层圆筒的轴向拉伸断裂强度约 1500MPa,模量约 170GPa。由图 2 可以看出,纯螺旋层圆筒在受到轴向拉伸载荷的作用下,其应

力和应变呈较好的线性关系,根据测得的应力-应变曲线得到其轴向拉伸断裂应变约 0.9%。

2.2 螺旋层加环向层圆筒轴向拉伸性能分析

2.2.1 碳纤维 S

分别对环向层复合材料和螺旋层复合材料的轴向拉伸性能进行单独研究后,按照标准圆筒复合材料缠绕工艺,环向层纤维使用碳纤维 S,螺旋层使用碳纤维 M,制备了螺旋层加环向层(M+S)的圆筒试样进行拉伸测试,其拉伸过程载荷-位移曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出,当载荷施加到一定程度(图中 A 点)时会突然下降,实验过程中此时复合材料发出清脆的响声,定义此时的载荷为初始失效载荷;之后随位移的增加,载荷继续增加,期间响声不断出现,直至最后一声巨响,圆筒复合材料整体断裂,此时的最大载荷即为断裂载荷。分别使用初始失效载荷和断裂载荷计算应力,记为初始失效力(σ_1)和最终失效力(σ_2),测试结果如表 4 所示,圆筒轴向拉伸的应力-应变曲线如图 4 所示。由表 4 中的测试结果可以看出,复合材料圆筒试样的轴向

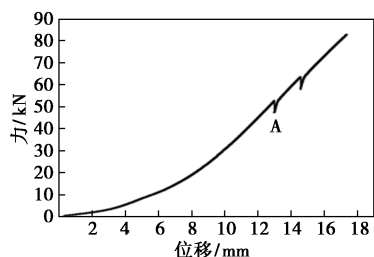


图 3 (M+S)圆筒轴向拉伸载荷-位移曲线

表 4 (M+S)圆筒试样轴向拉伸性能

样品编号	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	模量/GPa
1#	484.2	850.0	93.4
2#	408.5	808.0	89.1
3#	524.3	827.6	91.6
4#	474.9	727.4	88.6
均值	473.0	803.3	90.7
离散系数/%	10.1	6.65	2.47

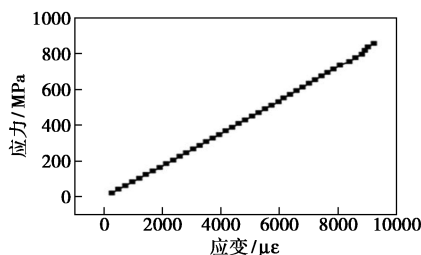


图 4 (M+S)圆筒轴向拉伸应力-应变曲线

拉伸模量数值比较稳定,均值约 90GPa,初始失效力均值约为 470MPa,最终失效力均值约为 800MPa。

复合材料圆筒断裂后照片如图 5 所示,由图可见,(M+S)圆筒复合材料在发生最终破坏时,螺旋层的 M 纤维发生了断裂。同时可以看到,断裂时筒身环向层也发生了多次的开裂。复合材料的最终断裂载荷较大,是由作为主要受力载体的螺旋层纤维发生断裂所致。发生第一次载荷下降时,环向层复合材料已经发生了开裂,此时其初始失效力约为 470MPa(表 4),轴向拉伸断裂应变约为 0.5%(图 4),这和前文得到的纯环向层 $\Phi 60$ (S)圆筒断裂应变吻合,说明载荷第一次力值下降是由于环向层复合材料达到了断裂应变,从而发生了破坏。本实验所应用的圆筒复合材料在实际工况中,如果发生了环向层的开裂,即已属于功能失效,因此将第一次出现载荷下降时的初始失效力作为判断圆筒复合材料是否失效的判别标准。从而可知,对于(M+T)圆筒,其失效力约 470MPa,轴向拉伸模量约 90GPa。

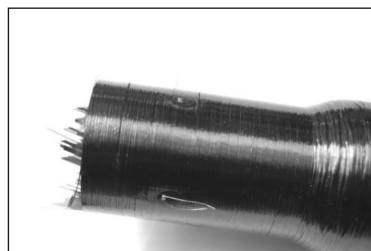


图 5 $\Phi 60$ (M+S)圆筒拉伸断裂试样

2.2.2 碳纤维 Z

环向层使用碳纤维 Z 通过同样的方法制备(M+Z)圆筒小样进行轴向拉伸测试,得到的轴向拉伸性能测试结果如表 5 所示,应力-应变曲线如图 6 所示。由表 5 中的结果可知,(M+Z)圆筒失效力均值约 600MPa,轴向拉伸弹性模量为 86GPa。由表 2 中纯环向(Z)圆筒轴向拉伸性能的分析可知,

表 5 (M+Z)圆筒轴向拉伸性能

项目	失效力/MPa	模量/GPa
1	611.1	91.1
2	620.0	85.4
3	565.6	84.1
4	600.9	82.6
均值	599.4	85.8
离散系数/%	3.98	4.33

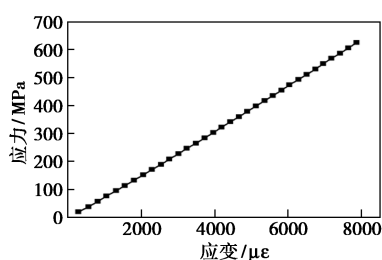


图6 (M+Z)圆筒轴向拉伸应力-应变曲线

其拉伸断裂应变约0.7%,根据其轴向拉伸的应力-应变关系计算得到,在Z环向层纤维达到断裂应变时,对应的应力约为600MPa,和实验测试得到的初始失效应力吻合。

由前文分析可知,由两种不同的铺层结构组成的复合材料圆筒,其环向层复合材料的轴向拉伸断裂应变小于螺旋层复合材料的轴向拉伸断裂应变。根据复合材料的最大应变破坏准则,该种结构的复合材料在轴向拉伸时,其破坏取决于先达到断裂应变的环向材料层。因此,如果环向层材料的断裂应变不同,最终复合材料的拉伸断裂初始失效应力也就不同。环向层采用不同碳纤维S和Z的复合材料失效应力分别为470MPa和600MPa。

3 结论

(1)对含有多层结构的复合材料轴向拉伸性能进行研究时,可采用结构分解的方法简化分析过程。

根据最大应变准则,复合材料断裂强度取决于首先达到断裂应变的材料层。对于本实验讨论的圆筒复合材料,其轴向拉伸断裂强度取决于断裂应变较小的环向层材料。

(2)转筒复合材料在初始失效前,环向层和螺旋层没有明显的剪切破坏,在受轴向拉伸载荷作用下两种结构的复合材料层同步变形,转筒复合材料的轴向拉伸模量主要取决于由高模纤维缠绕而成的螺旋层复合材料。

(3)由于碳纤维S和Z纯环向层圆筒轴向拉伸断裂应变的差异,多层结构圆筒复合材料使用两者作为环向层时的失效应力分别为470MPa和600MPa。

参考文献

- [1] 惠鹏,祖磊,李书欣,等.大张力缠绕碳纤维复合材料高速飞轮转子研究[J].玻璃钢/复合材料,2018(3):5-12.
- [2] 贺福.碳纤维复合材料在大飞机上的应用[J].高科技纤维与应用,2007,32(6):5-17.
- [3] 王瑛琪,盖登宇,宋以国.纤维缠绕技术的现状及发展趋势[J].材料导报,2012,25(5):110-112.
- [4] 何坤.碳纤维复合材料无人机机身铺层优化设计[J].中国设备工程,2018(8):83-84.
- [5] 段端祥,赵晓昱.纯电动汽车碳纤维复合材料电池箱体的铺层设计研究[J].玻璃钢/复合材料,2018(6):83-87.
- [6] 温卫东,李俭,崔海涛,等.缠绕线型对缠绕复合材料圆管轴向拉伸失效的影响[J].复合材料学报,2014,31(4):1084-1089.
- [7] Janoschka T, Hager M D, Schubert U S. Powering up the future: radical polymers for battery applications[J]. Advanced Materials, 2012, 24: 6397-6409.
- [8] Wei X, Xu W, Vijayakumar M, et al. TEMPO-based catholyte for high-energy density nonaqueous redox flow batteries[J]. Advanced Materials, 2014, 26: 7649-7653.
- [9] Takechi K, Kato Y, Hase Y. A highly concentrated catholyte based on a solvate ionic liquid for rechargeable flow batteries[J]. Advanced Materials, 2015, 27: 2501-2506.
- [10] Liu T, Wei X, Nie Z, et al. A total organic aqueous redox flow battery employing a low cost and sustainable methyl viologen anolyte and 4-HO-TEMPO catholyte[J]. Advanced Energy Materials, 2016, 6: 1501449.
- [11] Zvarych V I, Stasevych M V, Lunin V V, et al. Synthesis of (1H-pyrrol-1-yl) anthracene-9, 10-diones[J]. Chemistry of Heterocyclic Compounds, 2016, 52: 421-423.
- [12] Ba Y, Mathias E V. Nitroxide free radical synergized antineoplastic agents, US20080318907A1[P]. 2008-12-25.
- [13] Keeley G P, Lyons M E G. The effects of thin layer diffusion at glassy carbon electrodes modified with porous films of single-walled carbon nanotubes[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2009, 4: 794-809.
- [14] Luo J, Sam A, Hu B, et al. Unraveling pH dependent cycling stability of ferricyanide/ferrocyanide in redox flow batteries[J]. Nano Energy, 2017, 42: 215-221.
- [15] Lu J, Ma J, Yi J, et al. Electrochemical polymerization of pyrrole containing TEMPO side chain on Pt electrode and its electrochemical activity[J]. Electrochimica Acta, 2014, 130: 412-417.
- [16] Tong L C, Chen Q, Wong A A, et al. UV-Vis spectrophotometry of quinone flow battery electrolyte for in situ monitoring and improved electrochemical modeling of potential and quinhydrone formation[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2017, 19: 31684-31691.
- [17] Luo J, Hu B, Debruler C, et al. Unprecedented capacity and stability of ammonium ferrocyanide catholyte in pH neutral aqueous redox flow batteries[J]. Joule, 2019, 3: 149-163.
- [18] Ding Y, Zhang C K, Zhang L Y. Molecular engineering of organic electroactive materials for redox flow batteries[J]. Chemical Society Reviews, 2018, 47: 69-103.
- [19] Peng H L, Yu Q C, Wang S P, et al. Molecular design strategies for electrochemical behavior of aromatic carbonyl compounds in organic and aqueous electrolytes[J]. Advanced Science, 2019, 6: 1900431.
- [20] Zhao H Y, Wang J W, Zheng Y H, et al. Organic thiocarboxylate electrodes for a room-temperature sodium-ion battery delivering an ultrahigh capacity[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2017, 56: 15334-15338.

(上接第149页)