

三种 T700 级碳纤维及其复合材料性能比较

李桂洋 李健芳 杨云华 郭鸿俊 孙宏杰

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 对 MT700、T700-A 及 T700-B 三种碳纤维拉伸性能、表面形貌、单向板力学性能及网格加筋圆筒轴压稳定性进行逐级对比研究。结果表明:MT700 碳纤维拉伸性能达到同级别进口碳纤维水平且具有高模量特征;MT700 碳纤维表面均布沟槽的结构特点使得 MT700/603 复合材料体系表现出良好的界面性能和拉伸-压缩匹配性,单向板压缩强度、层剪强度及弯曲强度均明显高于 T700-A/603 和 T700-B/603;MT700/603 网格加筋圆筒轴压破坏强度及模量分别达到 870 kN 和 108.2 GPa,相比于 T700-B/603 分别提高 11.5%和 33.1%。MT700 碳纤维更适用于制备航天领域结构复杂承力构件。

关键词 MT700 碳纤维,复合材料,力学性能,网格加筋圆筒,轴压稳定性

中图分类号:TB332

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.04.008

Comparative Study on Properties of Three T700 Grade Carbon Fibers and Their Epoxy Matrix Composites

LI Guiyang LI Jianfang YANG Yunhua GUO Hongjun SUN Hongjie

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The tensile properties, surface morphology, laminate mechanical properties and AGS cylinder axial compression stability of MT700 carbon fiber have been studied gradually, compared with T700-A and T700-B carbon fibers. The tensile strength of MT700 has catch up with T700-A and T700-B. The homogeneous groove on fiber surface could effectively improve its interfacial property and tensile-compress compatibility. Therefore, the compressive strength, interlaminar shear strength and flexural strength for MT700/603 are superior to T700-A/603 and T700-B/603. The maximum failure load and axial compression modulus of MT700/603 AGS cylinder are as high as 870 kN and 108.2 GPa, respectively, which have increased by 11.5% and 33.1% compared to T700-B/603. The results demonstrated that MT700 carbon fiber is suitable for preparing load-carrying component in aerospace structural composites.

Key words MT700 carbon fiber, Composite, Mechanical property, AGS cylinder, Axial compression stability

0 引言

聚丙烯腈基碳纤维具有高比强度、高比模量、耐高温、耐腐蚀、抗疲劳和低热胀系数等优异特性,是发展先进一代运载火箭、战略导弹的关键性基础材料^[1-3]。根据拉伸性能指标,聚丙烯腈基碳纤维可以分为通用标模型(T300级)、高强标模型(T700级)、高强中模型(T800级)及高模型碳纤维。国外航天结构系统已经实现采用高强度型 T700 级碳纤维取代通用型 T300 级碳纤维应用于制备复合材料主承力结构件^[4-5]。目前,我国也突破了 T700 级碳纤维工程化

研制的关键技术并具备百吨级生产能力,力学性能已经达到同级别进口 T700 碳纤维水平^[6-7]。然而,碳纤维在复合材料中性能的发挥不仅取决于自身的力学性能,还与碳纤维表面微观形貌密切相关。如东丽公司 T700 级碳纤维单丝圆度良好且表面光滑,复合材料界面性能较差,适用于主要发挥纤维拉伸强度的缠绕工艺;而东邦公司 T700 级碳纤维表面粗糙度大且存在沟槽,复合材料界面性能有所改善,表现出良好的压缩和剪切性能,适用于制备复杂的承力构件^[8-10]。因此,研究国产 T700 级碳纤维性能及结构

收稿日期:2016-04-29

作者简介:李桂洋,1985 年出生,博士,主要从事耐高温热固树脂的设计与合成及先进树脂基复合材料成型工艺研究。E-mail:guiyang_lee@outlook.com

特点对复合材料力学性能的影响,对国产碳纤维在航天装备上的大规模应用具有重要意义。

本文选取 MT700、T700-A 和 T700-B 碳纤维,对比了三种碳纤维性能及表面形貌差异,并考察其对复合材料力学性能的影响;选取 $\Phi 1$ m 网格加筋圆筒作为研究对象,通过轴压破坏试验分析 MT700 碳纤维在复杂结构件中的应用,以期为航天结构复合材料的设计选材与工程应用提供技术支撑。

1 实验

1.1 材料

MT700-6k 碳纤维(MT700),国产;T700-A 及 T700-B 碳纤维,外购;耐高温环氧树脂 603,自制;MT700/603、T700-A/603 及 T700-B/603 预浸料,自制。

1.2 试验件制备

复合材料单向板: MT700/603、T700-A/603、T700-B/603 预浸料按照测试标准要求的铺层顺序进行铺层,采用热压罐工艺进行固化。 $\Phi 1$ m 网格加筋圆筒试验件:直径 1 m,高度 720 mm,筋条尺寸 2 mm \times 6 mm,环筋沿 90° 缠绕,间距 190 mm,纵筋沿 0° 缠绕,间距 8°,蒙皮 1.5 mm。铺层顺序[90°/($\pm 38^\circ$)₄/90°],采用热压罐工艺进行固化,试验件无损检测要求缺陷比例 < 1%。

1.3 实验仪器及方法

材料力学性能测试:美国 Sintech 万能力学性能试验机,复合材料单向板拉伸性能按照 GB/T3354—1999 测试,压缩性能按照 GB/T3856—2005 测试,弯曲性能按照 GB/T3356—99 测试,层间剪切强度按照 JC/T773—1996 测试。扫描电子显微镜(SEM)采用德国 ZEISS 扫描电镜分析仪;轴压破坏实验采用 WAW2000F 轴压试验机,加载精度 0.5%,LXI 数据采集系统,精度误差 0.5%,加载速度 5 kN/s 逐级加载。

2 结果与讨论

2.1 碳纤维性能及表面形貌

表 1 列出了 MT700、T700-A、T700-B 三种碳纤维的拉伸性能及体密度,实验结果为同一测试标准下的实测数据。

表 1 三种碳纤维的拉伸性能及体密度

Tab.1 Tensile properties and densities of three carbon fibers

carbon fibers	tensile strength /GPa	tensile modulus /GPa	elongation /%	density /g·cm ⁻³
MT700	5.04	255	1.98	1.78
T700-A	4.96	245	2.02	1.78
T700-B	5.15	234	2.20	1.80

结果表明 MT700 碳纤维拉伸力学性能整体上达到了同级 T700-A 及 T700-B 水平。其中,MT700 碳纤维材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016 年 第 4 期

纤维拉伸强度达到 5.04 GPa,介于 T700-A 与 T700-B 之间;MT700 碳纤维拉伸模量高于 T700-A 及 T700-B,即 MT700 碳纤维具有良好的刚性;纤维断裂延伸率测试结果显示 MT700 碳纤维的断裂韧性略低于同级别两种碳纤维。另外,MT700、T700-A 和 T700-B 碳纤维的体密度分别为 1.78、1.78 及 1.80 g/cm³,证明三种碳纤维结构内部原纤排列的致密化程度基本一致^[11]。

图 1 为三种碳纤维的表面微观形貌,明显可以看出 MT700 碳纤维直径较小而且纤维表面具有较深的沟槽。MT700 碳纤维采用湿法纺丝工艺制备,纤维表面粗糙度较大,但是通过对纺丝工艺控制能够实现纤维表面沟槽的均匀化,受力过程中不会产生明显的应力集中点而影响纤维力学性能;另一方面,纤维表面均匀的沟槽与树脂基体之间能够产生较强的“机械啮合力”,有利于提高复合材料的界面性能。T700-A 碳纤维也是通过湿法纺丝工艺制备,由于纺丝工艺控制手段的差别,纤维表面沟槽较浅。T700-B 碳纤维则显示出典型的干喷湿纺工艺特征,纤维直径大且表面比较光滑。

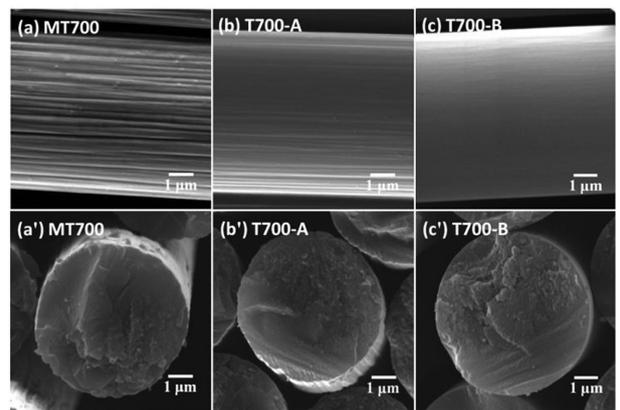


图 1 三种碳纤维表面及断口形貌

Fig.1 Surface morphology and fracture morphology of three carbon fibers

由于三种碳纤维的力学性能及体密度接近,其断口形貌也大体一致。但是,T700-A 和 T700-B 断裂带比较均匀宽厚且断裂面粗糙;MT700 碳纤维断裂带呈现出部分脆性断裂特征,断裂面凹凸不平且断口较为光滑。断口形貌的细微差别反映出三种碳纤维拉伸模量、断裂延伸率及体密度的变化特征。

2.2 复合材料力学性能

图 2 比较了三种复合材料单向板 0° 拉伸强度、压缩强度、弯曲强度及层间剪切强度。在树脂基体相同的条件下,MT700/603 复合材料单向板 0° 拉伸强度略低于 T700-B/603,但明显高于 T700-A/603,复合材料单向板与碳纤维拉伸强度变化规律一致,表明碳纤维拉伸强度在复合材料中得到有效发挥,复合材

料单向板拉伸强度达到同级别进口碳纤维复合材料水平。

值得注意的是 MT700/603 复合材料单向板 0° 压缩强度、弯曲强度及层间剪切强度都显著高于 T700-A/603 及 T700-B/603。其中, MT700/603 压缩强度相比于 T700-A/603 和 T700-B/603 分别提高了 48% 和 14%, 层间剪切强度也分别提高了 24% 和 20%, 该结果归因于 MT700 碳纤维独特的表面形貌特征。一方面, MT700 碳纤维表面具有均匀分布的沟槽, 其表面粗糙度明显高于 T700-A 及 T700-B, 复合过程中

纤维与树脂间产生较强的“机械啮合力”, 能够有效提高复合材料的界面粘结性; 另一方面, MT700 碳纤维表面复杂的沟槽提高了其可接触比表面积, 在相同上浆处理条件下纤维表面能够参与树脂聚合反应的活性基团更多, 进一步提高了纤维与树脂基体之间的结合力^[12-14]。碳纤维与树脂基体之间优异的界面性能起到了良好的载荷传递作用并有效抑制了加载过程中复合材料内部损伤与裂纹的扩展, 使得 MT700 碳纤维复合材料具有优异的压缩性能及层间剪切性能。

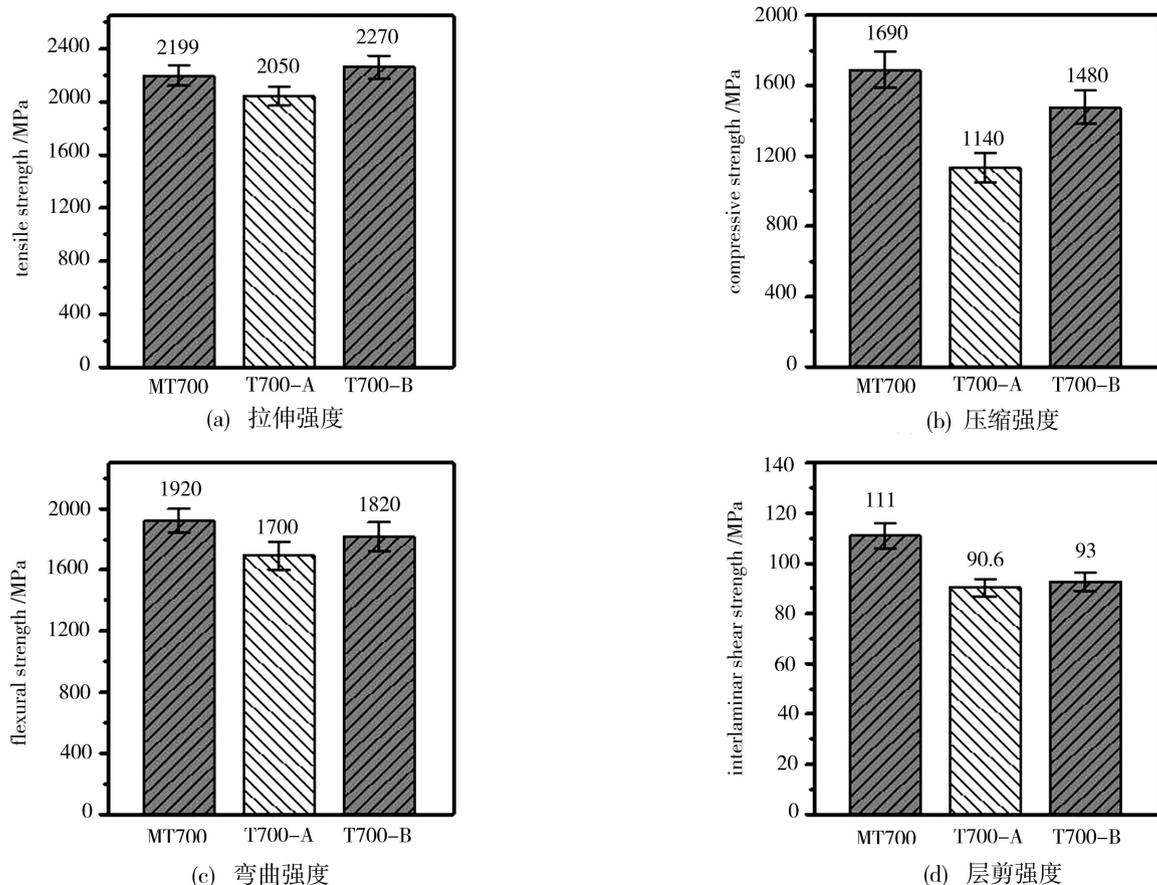


图2 MT700/603、T700-A/603及T700-B/603单向板强度对比

Fig.2 Comparison of MT700/603, T700-A/603 and T700-B/603 laminate strength

MT700/603 的弯曲强度也高于 T700-A/603 及 T700-B/603。因为复合材料单向板弯曲受力状态是拉伸、压缩及层间剪切三种作用的综合体现, 其中 MT700/603 较高的压缩和层间剪切强度补偿了拉伸强度稍低对弯曲性能的影响, MT700 碳纤维在复合材料中表现出优异的拉伸-压缩匹配性, 有利于复合材料综合力学性能的发挥, 适用于制备复杂载荷环境下的承力构件。图 3 是三种复合材料的 0° 拉伸、压缩及弯曲模量的测试结果。相比于 T700-A/603 及 T700-B/603 复合材料体系, MT700/603 的拉伸、压缩及弯曲模量分别提高了 20%~32%、34%~49% 和

16%~39%。MT700 碳纤维复合材料较高的模量特性更加符合航天结构复合材料刚度设计理念。

为了进一步证明上述论断, 采用 SEM 观察两种纤维表面结构差异较大的 MT700 与 T700-B 复合材料破坏面中碳纤维与树脂基体界面的形貌特征, 如图 4 所示。T700-B/603 体系破坏面特别光滑, 树脂碎片呈颗粒状附着在纤维表面, 表明纤维与树脂间的界面粘结力较弱; 而 MT700/603 体系破坏面非常粗糙, 树脂与纤维表面的粘连现象十分明显, 说明纤维与树脂界面结合得较为紧密, 两种复合材料体系的破坏面形貌与力学性能分析结果表现出一致的规律。

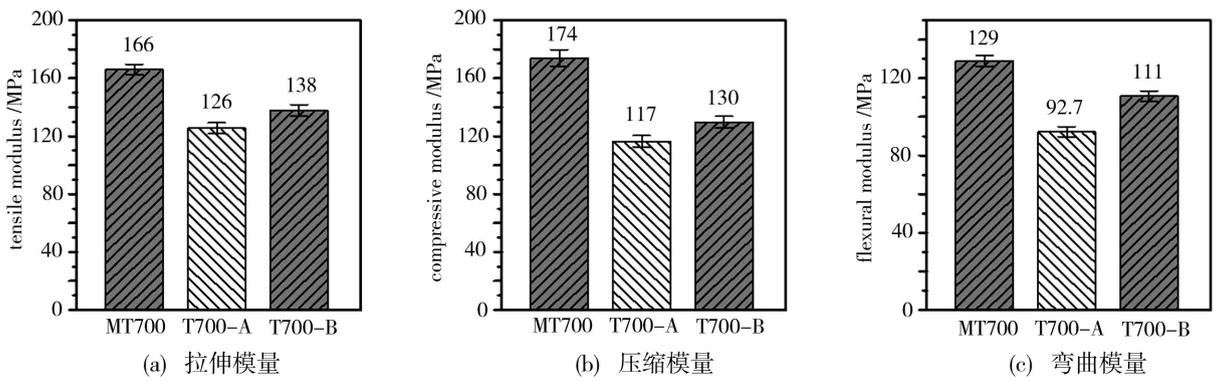


图3 MT700/603、T700-A/603及T700-B/603单向板模量对比

Fig.3 Comparison of MT700/603, T700-A/603 and T700-B/603 laminate modulus

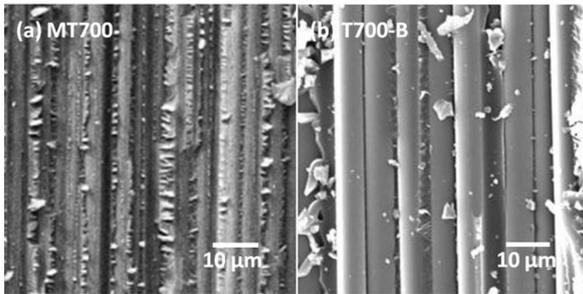


图4 MT700/603与T700-B/603复合材料破坏面形貌

Fig.4 Fracture morphology of MT700/603 and T700-B/603 composites

2.3 网格-蒙皮结构件轴压性能

网格-蒙皮结构件是典型的复合材料承力结构形式,具有优异的力学性能及结构效率。通过 $\Phi 1\text{ m}$ 网格加筋圆筒轴压破坏试验,考察 MT700 和 T700-B 复合材料体系网格-蒙皮结构的轴压稳定性、壳体刚度及破坏模式^[15],试验结果列于表 2 中。轴压载荷加载初始阶段,两个试验件均未发生明显的屈曲变形,表现出较好的线弹性特征,见图 5。

表 2 复合材料加筋圆筒轴向压缩试验结果

Tab.2 Experimental results of stiffened cylindrical shell under axial compression

composites	initial failure load /kN	maximum failure load/kN	axial compression modulus/GPa	maximum axial strain ($\mu\epsilon$)	maximum axial shift /mm
MT700/603	750	870	108.2	2407	0.98
T700-B/603	730	780	81.3	2619	1.21

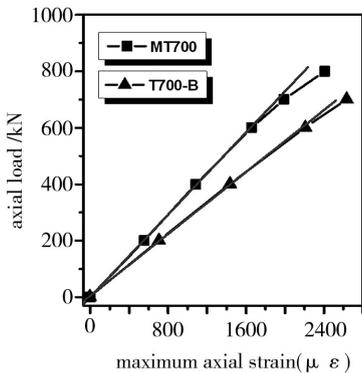


图5 MT700/603与T700-B/603网格加筋圆筒轴轴向载荷—应变曲线

Fig.5 Axial load-strain curves of MT700/603 and T700-B/603 stiffened cylindrical shell

的劈裂声,MT700/603 试验件初始破坏载荷为 750 kN,T700-B/603 试验件载荷达到 730 kN 即开始发生破坏;载荷增加至最大值时,试验件发生断裂性破坏并发出巨大声响,T700-B/603 试验件最大破坏载荷只有 780 kN,而 MT700/603 最大破坏载荷达到 870 kN,破坏载荷提高了 11.5%,试验结果表明 MT700 碳纤维在复合材料结构件中的轴压稳定性明显优于 T700-B 碳纤维。另外,试验件发生失稳破坏时,MT700/603 最大轴向应变及位移均低于 T700-B/603,表现出良好的壳体刚度。

图 6 中(a)和(a')为 MT700/603 试验件轴压破坏前后形貌,(b)和(b')为 T700-B/603 试验件轴压破坏前后形貌。从图中可以看出,两种试验件均发生整体失稳破坏,失稳波较宽且占环向周长 85%~90%,这类破坏形貌表明试验件加载过程中受力均匀,破坏过程承载充分,能够有效反映复合材料构件

T700-B/603 试验件轴压模量仅为 81.3 MPa,而 MT700/603 轴压模量达到 108.2 MPa,提高了 33.1%;轴压载荷增大到一定程度,试验件连续发出纤维断裂宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016 年 第 4 期

的本征抗压性能。

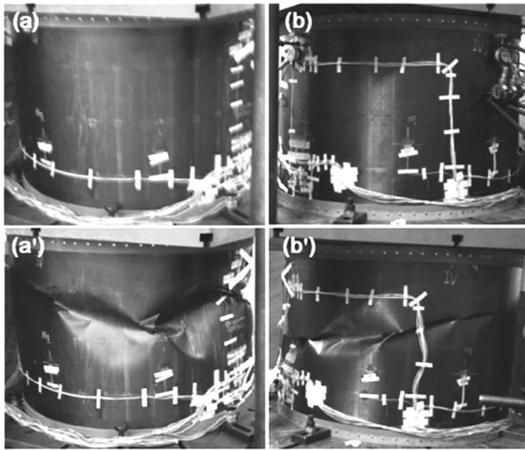


图6 MT700/603与T700-B/603网格加筋圆筒轴压破坏模式

Fig.6 Failure modes of MT700/603 and T700-B/603 stiffened cylindrical shell

3 结论

(1)通过MT700、T700-A及T700-B三种碳纤维力学性能及表面形貌的对比研究,可以得到MT700碳纤维拉伸性能已经达到同级别进口碳纤维的水平,其中拉伸模量高、表面均布沟槽是MT700碳纤维的显著特点。

(2)MT700碳纤维表面均匀的沟槽有利于提高复合材料界面性能,MT700/603单向板拉伸强度介于T700-A/603和T700-B/603之间,而压缩强度、弯曲强度、层剪强度均明显高于T700-A/603及T700-B/603,表现出良好的界面性能及拉伸-压缩匹配性;同时,MT700/603复合材料体系具有高模量特征,符合航天结构复合材料的刚度设计理念。

(3)MT700/603复合材料体系 $\Phi 1\text{ m}$ 网格加筋圆筒试验件的轴压破坏载荷达到870 kN,轴压模量为108.2 GPa;相比于T700-B/603试验件,分别提高了11.5%和33.1%,更适用于制备复杂载荷环境下的复合材料承力构件。

参考文献

- [1] CHAND S. Review: carbon fibers for composites[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(6): 1303-1313.
- [2] KOBETS L P, DEEV I S. Carbon fibers: structure and mechanical properties[J]. Composites Science and Technology, 1998, 57(12): 1571-1580.
- [3] 郭玉明,冯志海,王金明.高性能PAN基碳纤维及其复合材料在航天领域的应用[J].高科技纤维与应用, 2007, 32(5): 1-7.
- [4] 贺福,李润民.碳纤维在国防军工领域中的应用(1)[J].高科技纤维与应用, 2006, 31(6): 5-10.
- [5] 杜善义.先进复合材料与航空航天[J].复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
- [6] FENG Zhihai. Some ideas on requirement and development of China carbon fiber[J]. Advanced Materials Industry, 2010(9): 19-24.
- [7] HE Fu. Be necessary to prepare high property carbon fiber[J]. Hi-tech Fiber & Application, 2010(2): 14-18.
- [8] 张冬冬,杨永岗,谭松培,等.碳纤维表面状态对其复合材料性能的影响[J].化工新型材料, 2014, 42(1): 73-76.
- [9] 马金瑞,李敏,张佐光.典型碳纤维的表面能差异性研究[J].航空制造技术, 2014(11): 73-75.
- [10] 郝华,李鹏,凌辉,等.两种T700碳纤维表面特性及其复合材料界面性能[J].玻璃钢/复合材料, 2013(1): 30-34.
- [11] JOHNSON D J. Structure-property relationships in carbon fibers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1987, 20(3): 286-291.
- [12] DAI Zhishuang, SHI Fenghui, ZHANG Baoyang, et al. Effect of sizing on carbon fiber surface properties and fibers/epoxy interfacial adhesion[J]. Applied Surface Science, 2011, 257: 6980-6985.
- [13] 张宝艳,石峰晖,代志双,等.碳纤维上浆剂对树脂基复合材料界面性能影响[J].材料工程, 2011, 21: 29-33.
- [14] 胡培贤.氮化处理对碳纤维表面性能及其复合材料的影响[J].纺织学报, 2009, 30(2): 18-23.
- [15] 闫光,韩小进,阎楚良,等.复合材料圆柱壳轴压屈曲性能分析[J].复合材料学报, 2014, 31(3): 781-787.