

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.10.020

拉挤-真空导入成型聚氨酯/玻璃纤维复合材料及其力学性能

李庚¹, 邢素丽¹, 彭超义¹, 王遵², 陈煌², 喻熊²

(1. 国防科技大学空天科学学院, 长沙 410073; 2. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南株洲 412007)

摘要: 对拉挤-真空导入成型制备的聚氨酯/玻璃纤维(PUR/GF)复合材料板材的力学性能进行研究, 并与传统真空导入成型工艺制备的板材和拉挤板材进行比较。结果表明: 和真空导入成型工艺制备的复合材料板材相比, 拉挤-真空导入成型工艺制备的复合材料板材, 其拉伸强度由1 091.58 MPa提高到1 246.62 MPa, 提升了14.20%, 其拉伸弹性模量由43.90 GPa提高到56.26 GPa, 提升了28.15%, 弯曲强度由1 220.50 MPa提高到1 350.47 MPa, 提升了10.65%, 弯曲弹性模量由32.36 GPa提高到52.73 GPa, 提高了62.95%, 短梁剪切强度由65.88 MPa降低到63.41 MPa, 降低了3.75%; 和拉挤板材比较, 拉挤-真空导入成型工艺制备的复合材料板材的力学性能有一定幅度的损失。

关键词: 拉挤成型; 真空导入成型; 复合材料; 力学性能; 风电叶片

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)10-0103-04

Mechanical Properties of Polyurethane/Glass Fiber Composites Prepared by Pultrusion-Vacuum Infusion

Li Geng¹, Xing Suli¹, Peng Chaoyi¹, Wang Zun², Chen Huang², Yu Xiong²

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Zhuzhou Times Material Technology Co., LTD., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: The mechanical properties of polyurethane/glass fiber (PUR/GF) composites prepared by pultrusion-vacuum infusion molding process were studied. A comparison with the composites prepared by traditional vacuum infusion and pultrusion was made. The results show that in comparison with the composites prepared by vacuum infusion molding process, the tensile strength of the composites is increased from 1 091.58 MPa to 1 246.62 MPa, increased by 14.20%, the tensile modulus increased from 43.90 GPa to 56.26 GPa, increased by 28.15%, the flexural strength increased from 1 220.50 MPa to 1 350.47 MPa, increased by 10.65%, flexural modulus increased from 32.36 GPa to 52.73 GPa, increased by 62.95%, short beam shearing strength is decreased from 65.88 MPa to 63.41 MPa, decreased by 3.75%. In comparison with the composites prepared by pultrusion, the mechanical properties have a certain range of loss.

Keywords: pultrusion; vacuum infusion; composite; mechanical property; wind turbine blade

风力发电是目前新能源领域中技术最成熟、最具规模、商业化发展最具前景的发电方式之一。风电叶片为风力发电机组中关键设备, 决定着发电效率, 直接影响业主经济收益。叶片大型化、轻量化、低成本化趋势日益明显^[1], 因而寻找质量更轻、性价比更高的原材料, 探索高成型质量、高生产效率、低生产成本的成型工艺^[2], 成为风电行业重要的研究方向。

真空导入工艺是一种大尺寸复合材料制件的液体模塑成型技术^[3]。该工艺是目前MW级大叶片制造所普遍采取的一种成型技术^[4], 但传统方式是将增强材料编织成布后铺设灌注树脂, 编织工艺决定了不能充分发挥纤维性能, 而真空导入工艺对工艺条件的苛刻要求造成工艺质量风险较高^[5], 风电行业业内都在探索拉挤工艺来制作风电叶片主梁、辅梁和叶根。黄辉秀等^[6]采用拉挤工艺制得的

通讯作者: 邢素丽, 博士, 教授, 主要从事复合材料结构设计与成型工艺、复合材料修复研究 E-mail: xingsuli@nudt.edu.cn

收稿日期: 2018-08-05

引用格式: 李庚, 邢素丽, 彭超义, 等. 拉挤-真空导入成型聚氨酯/玻璃纤维复合材料及其力学性能分析[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(10):103-106.

Li Geng, Xing Suli, Peng Chaoyi, et al. Mechanical properties of polyurethane/glass fiber composites prepared by pultrusion-vacuum infusion[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(10):103-106.

板材来制备风电叶片主梁,可有效提高材料的拉伸强度和弹性模量,大大提高风电叶片的牢固程度,叶片不易变形,可以克服传统真空导入工艺单向布铺设过程易出现褶皱、层间气泡等质量问题。解祥夫等^[7]则先预铺设拉挤板材,然后进行捆绑成预制梁,再整体调运至壳体内一次灌注成风电叶片。宋秋香等^[8]使用由拉挤工艺制造的带材,其纤维体积分数高于60%,将带材切割为多种不同长度的片材,并将片材的两端加工为楔形,将片材堆叠捆绑形成主承力结构预制件,从而来制备风电叶片,能够减轻质量、降低制造成本。周凯^[9]发明一种提高风电叶片根部拉挤预制件表面度和尺寸一致性的方法。拉挤成型是制造高纤维体积含量、高性能、低成本树脂基复合材料型材的一种工艺方法^[10-11],其具有一系列的特点^[12-17],如生产效率高、适于大批量生产,生产过程连续进行、制品质量重复性好,变形率低,热变形温度高等。但其制品不可避免地存在不能利用非连续的增强材料、产品形状单调,只能生产线形型材(非变截面制品)、横向强度和剪切强度不高等缺点。

笔者首先通过拉挤成型工艺制备聚氨酯/玻璃纤维拉挤板材,再将所得拉挤板材利用真空导入成型工艺制备风电叶片主梁结构小样件,研究其基本力学性能,旨在提供一种新的风电叶片主梁制作工艺,达到对风电叶片的减重及性能提升的目的。

1 实验部分

1.1 主要原材料

聚氨酯/玻璃纤维拉挤板:宽度为105 mm,厚度为2 mm,重庆国际复合材料有限公司;

单向玻璃纤维布:TM II型,重庆国际复合材料有限公司,其面密度为1200 g/m²;

聚氨酯树脂:科思创聚合物(中国)有限公司。

1.2 主要设备及仪器

旋叶式真空泵:2XZ-2型,浙江台州求真真空泵有限公司;

加热刚性模具平台:自制;

真空干燥箱:YLD-6000型,南通锻压设备有限公司;

电热鼓风干燥箱:101-3AB型,上海一恒科学仪器有限公司;

马弗炉: SX-2.5-10型,天津市泰斯特仪器有限公司;

万能力学试验机:WDW-100型,长春材料试验机厂;

高低温电子万能试验机: JYW-93Z100Z型, Wick/Roell公司。

1.3 玻璃纤维布干燥除湿预处理

将裁剪的多层单向玻纤布对齐、密封,进真空袋压模具系统,一泵抽气口抽真空再保压,保压结束后,将注胶口连接至二泵,反向继续抽真空,开加热系统升温至45℃,保温抽湿3 h。

1.4 复合材料板材制备

真空导入成型复合材料制备时,铺放2层玻璃纤维布。拉挤-真空导入成型复合材料制备时,铺放2层长1000 mm的拉挤板材,拉挤板层间铺放一层面密度200 g/m²玻纤织物。

将聚氨酯树脂和固化剂提前在(23±2)℃环境下恒温24 h,25℃室温下将聚氨酯树脂和固化剂混配,混配比为100:84(质量分数),注胶,固化,其固化制度为50℃/2 h+70℃/4 h。

1.5 性能测试

聚氨酯/玻璃纤维复合材料板材的纤维体积分数按照国标GB/T 2577-2005采用烧蚀法测试其树脂含量,换算得到其纤维体积分数。

拉伸性能测试按ISO 527-5-1997标准,拉挤板材及真空导入成型板材试样尺寸为250 mm×15 mm×2 mm,拉挤-真空导入成型板材试样尺寸250 mm×15 mm×4 mm,拉伸速度为2 mm/min。

弯曲性能测试按ISO 14125-1998标准,拉挤板材及真空导入成型板材试样尺寸为80 mm×10 mm×2 mm,跨距32 mm,拉挤-真空导入成型板材试样尺寸为100 mm×10 mm×4 mm,跨距64 mm,加载速度为2 mm/min。

短梁剪切性能测试按ISO 14130-1997标准,拉挤板材及真空导入成型板材试样尺寸为20 mm×10 mm×2 mm,跨距10 mm,拉挤-真空导入成型板材试样尺寸为40 mm×20 mm×4 mm,跨距20 mm,加载速度为1 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 纤维含量

表1为不同成型工艺聚氨酯/玻璃纤维复合材料的纤维含量。如表1所示,拉挤-真空导入成型的聚氨酯/玻璃纤维板材其密度比真空导入成型的聚氨酯/玻璃纤维板材密度大,其纤维体积分数也由53.48%提高到62.18%,提升了8.7%;拉挤-真空导入成型的聚氨酯/玻璃纤维板材和拉挤板材自身相比,其密度和纤维体积分数都有小幅度降低。

表 1 不同成型工艺聚氨酯/玻璃纤维复合材料的密度及纤维含量

成型工艺	密度/(g·cm ⁻³)	纤维体积分数/%
真空导入	1.93	53.48
拉挤	2.13	67.31
拉挤-真空导入	2.06	62.18

2.2 拉伸性能

图 1 为聚氨酯/玻璃纤维复合材料拉伸应力-应变曲线。从图 1 可以看出,拉挤-真空导入成型板材拉伸弹性模量和拉伸强度比真空导入成型板材的都要高,但和原始拉挤板材相比,其拉伸强度和拉伸弹性模量都降低了,这是因为在拉挤-真空导入成型板材制备过程中,为了提高两层拉挤板材之间的界面结合性能,在拉挤板材层间铺放了一层低面密度的玻纤织物,其拉伸性能是远远低于拉挤板材的,层间玻纤布的引入导致拉挤-真空导入板材性能较拉挤板材有一定幅度降低。

表 2 数据显示拉挤-真空导入成型的板材和真空导入成型板材相比,其拉伸强度由 1091.58 MPa 提高到 1246.62 MPa,提高了 14.20%,其拉伸弹性模量由 43.90 GPa 提高到 56.26 GPa,提升了 28.15%。和拉挤板材相比,拉挤-真空导入板材的拉伸强度损失了 8.58%,拉伸弹性模量损失了 9.74%。

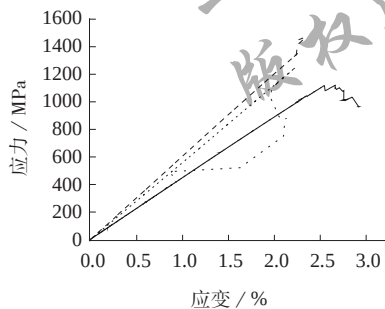


图 1 聚氨酯/玻璃纤维复合材料拉伸应力-应变曲线

表 2 不同成型工艺聚氨酯/玻璃纤维复合材料的拉伸性能

成型工艺	拉伸强度/MPa	拉伸弹性模量/GPa
真空导入	1091.58	43.90
拉挤	1363.74	62.33
拉挤-真空导入	1246.62	56.26

2.3 弯曲性能

图 2 为聚氨酯/玻璃纤维复合材料弯曲应力-挠度曲线。由图 2 可知拉挤-真空导入成型制备的板材其弯曲强度高于真空导入成型制备的板材,却比拉挤板材的弯曲强度要低很多,降幅达 24.29%。表 3 为不同成型工艺聚氨酯/玻璃纤维复合材料的弯曲性能。由表 3 可知,拉挤-真空导入成型的板材和真空导入成型制备的板材相比,其弯曲弹性模

量由 32.36 GPa 提高到 52.73 GPa,提升了 62.95%,和拉挤板材相比,其弯曲弹性模量基本不变。

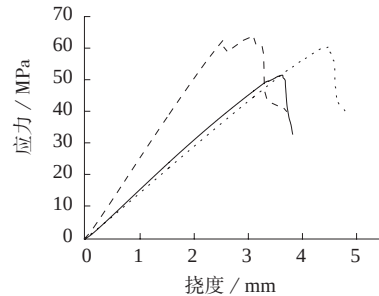


图 2 聚氨酯/玻璃纤维复合材料弯曲应力-挠度曲线

表 3 不同成型工艺聚氨酯/玻璃纤维复合材料的弯曲性能

成型工艺	弯曲强度/MPa	弯曲弹性模量/GPa
真空导入	1220.52	32.36
拉挤	1783.83	52.77
拉挤-真空导入	1350.47	52.73

2.4 剪切性能

图 3 为聚氨酯/玻璃纤维复合材料短梁剪切应力-挠度曲线。由图 3 可知,拉挤-真空导入成型制备的板材的层间剪切性能较小,究其原因,还在于两层拉挤板之间结合的部位,其层间的界面性能相对较弱。表 4 为不同成型工艺聚氨酯/玻璃纤维复合材料的短梁剪切强度。由表 4 可知,三种成型工艺板材相比,拉挤-真空导入成型制备的板材其短梁剪切强度较真空导入成型板材降低了 3.75%,较拉挤板材降低了 7.81%。

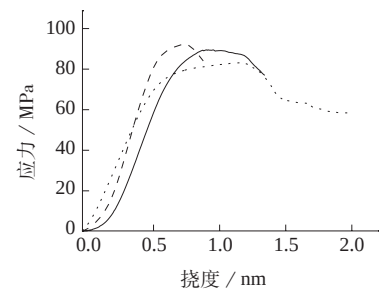


图 3 聚氨酯/玻璃纤维复合材料短梁剪切应力-挠度曲线

表 4 不同成型工艺聚氨酯/玻璃纤维复合材料的短梁剪切强度

成型工艺	剪切强度/MPa
真空导入	65.88
拉挤	68.78
拉挤-真空导入	63.41

3 结论

(1) 拉挤-真空导入成型制备的聚氨酯/玻璃纤维复合材料和真空导入成型制备的聚氨酯/玻璃纤维复合材料相比,其拉伸强度由 1091.58 MPa 提高到 1246.62 MPa,提升了 14.20%,拉伸弹性模量由 43.90 GPa 提高到 56.26 GPa,提升了 28.15%,

其弯曲强度由 1 220.50 MPa 提高到 1 350.47 MPa,提升了 10.65%,其弯曲弹性模量由 32.36 GPa 提高到 52.73 GPa,提升了 62.95%,其短梁剪切强度由 65.88 MPa 降低到 63.41 MPa,降低了 3.75%。

(2) 拉挤-真空导入成型制备的聚氨酯/玻璃纤维复合材料和拉挤成型板材相比,其拉伸强度损失 8.58%,拉伸弹性模量损失 9.74%,弯曲强度损失 24.29%,弯曲弹性模量基本不变,剪切强度损失 7.81%。

(3) 拉挤-真空导入成型工艺可以应用于风电叶片主梁制备过程,亦可推广到其它大型复合材料构件或装备,需要注意的是在采用拉挤-真空导入成型制备复合材料时,其层间剪切强度略显不足,要设法提高拉挤板材层间的界面结合强度,这也是此工艺未来需要研究的方向之一。

参考文献

- [1] 马祥林,任婷,徐卫平.大型碳纤维复合材料风机叶片成型工艺与发展[J].纤维复合材料,2011(3):26-29.
Ma Xianglin, Ren Ting, Xu Weiping. The development and molding process of carbon fiber reinforced polymer in large wind turbine blades[J]. Fiber Composites, 2011(3):26-29.
- [2] 徐宇,廖猜猜,张淑丽,等.大型风电叶片设计制造技术发展趋势[J].中国科学:物理学力学天文学,2016,46:124 702(1-7).
Xu Yu, Liao Caicai, Zhang Shuli, et al. Developing trend of design and manufacture technology for large-scale wind turbine blade[J]. Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46:124 702(1-7).
- [3] 徐戈,牛娟娟,魏毅.真空导入模塑工艺(VIMP)叶片实用工艺探究[J].玻璃钢/复合材料增刊,2014:140-144.
Xu Ge, Niu Juanjuan, Wei Yi. Vacuum infusion molding process to explore practical technology of blade[J]. FRP/CM supplement, 2014:140-144.
- [4] 郝志勇.真空导入工艺在风电叶片领域的应用与研究[J].天津科技,2011,38(3):28-30.
Hao Zhiyong. The application and research of vacuum infusion molding process in wind blade[J]. Tianjin Sci-Ence & Technology, 2011, 38(3):28-30.
- [5] 沈葛,孙洲.浅谈真空灌注工艺成型条件及常见缺陷修复[J].天津科技,2014,41(6):88-91.
Sheng Ge, Sun Zhou. Molding conditions of FRP vacuum infusion process and the repairing of common defects[J]. Tianjin Science & Technology, 2014, 41(6):88-91.
- [6] 黄辉秀,武莉萍,于永峰,等.一种采用拉挤工艺制造的单向片材制造风机叶片主梁或辅梁的方法:中国,103921457A[P].2014-07-16.
Huang Huixiu, Wu Liping, Yu Yongfeng, et al. The invention relates to a method of making the main beam or auxiliary beam of the wind blade with a unidirectional sheet material manufactured by pultrusion process: CN, 103921457A[P].2014-07-16.
- [7] 解祥夫,季小强,刘时海,等.采用拉挤成型的板材制作风电叶片的工艺:中国,106945306A[P].2017-07-14.
Xie Xiangfu, Ji Xiaoqiang, Liu Shihai, et al. The technology of making wind turbine blade by pultrusion plates: CN, 106945306A[P]. 2017-07-14.
- [8] 宋秋香,贾智源.风力发电叶片及其制作方法:中国, CN106903917A[P].2017-06-30.
Song Qiuxiang, Jia Zhiyuan. Wind turbine blades and their making method: CN, 106903917A[P].2017-06-30.
- [9] 周凯.提高风电叶片根部拉挤预制件表面度和尺寸一致性的方法:中国,105881936A[P].2016-08-24.
Zhou Kai. A method to improve the surface degree and dimension consistency of pultrusion prefabricated wind turbine blades root: CN, 105881936A[P].2016-08-24.
- [10] Michael Bannister. Challenges for composites in to the next millennium a reinforcement perspective. Composite Part A 32, 2001:901-910.
- [11] Roux J A, Vaghan J G, Shanku R, et al. Comparison of measurements and modeling for pultrusion of a fiberglass / epoxy i-beam[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1998(17):1 557-1 579.
- [12] 周效凉,钱春香,王继刚,等.连续纤维增强热塑性树脂基复合材料拉挤工艺研究与应用现状[J].高科技纤维与应用,2004, 29(1):41-45.
Zhou Xiaoliang, Qian Chunxiang, Wang Jigang, et al. The research and application of pultrusion for continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2004, 29(1):41-45.
- [13] 徐以扬,方海,刘伟庆.复合材料拉挤型材在桁架桥梁结构中的应用与发展[J].世界桥梁,2010(4):32-34.
Xu Yiyang, Fang Hai, Liu Weiqing. Application and development of composite materials in truss bridge structures[J]. World Bridges, 2010(4):32-34.
- [14] 袁渐超,黄鹏超,王国栋.FRP在人行天桥上的应用研究[J].世界桥梁,2014(5):63-67.
Yuan Jianchao, Huang Pengchao, Wang Guodong. Study of application of FRP to footbridges[J]. World Bridges, 2014(5):63-67.
- [15] Al-Assafi S, Haag B, Holdsworth P G. Examination of Process Parameters for The Injection of Unidirectional Pultruded Composites[C].Advanced Materials and Processes, Affordabilities for the New Age, Proceedings of the, Jubilee International Sampe Europe Conference.1999.
- [16] 康洪彬,方家芳.欧洲与美国拉挤工业的比较[J].纤维复合材料,1991(4):51-54.
Kang Hongbing, Fang Jiafang. Comparison of European and American extrusion industries[J].Fiber Composites, 1991(4):51-54.
- [17] 陈博.我国复合材料拉挤成型技术及应用发展情况分析[J].玻璃钢/复合材料,2014(9):34-41.
Chen Bo. Development of the composites pultrusion process & applications in China[J].FRP/CM, 2014(9):34-41.