

风机叶片用缝编织物渗透性能评估

颜鸿斌 安明康 许晓燕 李东 蔡建强

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 在渗透性能测试方法归纳介绍的基础上,开展了试验及比较,初步确定了相应的测试试验规范。结合风机叶片的具体工艺和使用部位等,初步选定了缝编织物的渗透性能评估参数和测试方法,以对风机叶片用缝编织物渗透性能测试评估方法的统一规范确定提供一些思路。

关键词 叶片,缝编织物,渗透性能

Permeability of Stitching Fabric for Wind Turbine Blade

Yan Hongbin An Mingkang Xu Xiaoyan Li Dong Cai Jianqiang

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

Abstract The paper summarizes the measure methods of permeability, and some test conditions are unified based on tests. Test methods of permeability of stitching fabric for wind turbine blade are established based on its process and parts in order to attempt to give some references to evaluate the permeability of the blade material and control blade quality.

Key words Blade, Stitching fabric, Permeability

0 引言

随着全球能源消费剧增,煤炭、石油、天然气等资源消耗速度加快,人们对环保、节能、无污染认识的逐步提高,风电作为一种可再生能源被越来越多的开发和利用^[1-3]。多轴向缝编织物作为一种高性能定向结构织物以其独特的纤维平直排列、工艺性能好、工艺效率高和优异的性能可设计性等特点,已成为风机叶片的最佳增强材料^[4-6]。

纤维增强材料渗透率是描述织物或增强体对流体流动阻力的物理参数,由纤维的物理特性及纤维层的内部结构决定^[7]。目前有多种测定渗透率的方法,但都没有形成统一规范^[8-11]。

本文在渗透性能测试方法归纳介绍的基础上,开展了试验研究,初步确定了相应的测试规范。

1 实验

1.1 织物渗透率测试方法及其基本原理^[12-15]

在树脂浸渍织物的过程中,树脂在织物的流动类似于液体在多孔介质中的流动,一般情况下假设树脂流过预制件的过程相当于不可压缩流体流经多孔介质的过程,树脂流动行为可以由 Darcy 定律表示。

在仅考虑重力影响的条件下,一般渗透率测试采

用 GB/T17470—2007,其最新版将推广到缝编织物等其他织物。

在考虑重力和其他压力影响的条件下,一般渗透率的测定采用在真空浸渍工艺或称真空吸附工艺(VARI)条件下进行。通常可将其分为单向饱和流动法(单向法)、径向流动法(径向法)和z向(厚度方向)渗透率测试方法(z向法)。渗透率实验中,Darcy定律一维方向的表达式为:

$$V = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta L} \quad (1)$$

式中,V为树脂流动速率; Δp 为大气压力差,其值为101.325 kPa; ΔL 为树脂的灌注位置(长度); μ 为树脂黏度。

单向法是在长方形(测面内渗透率)或圆柱状(测面外渗透率)模腔内,测量恒定流速的树脂在已饱和的纤维体内的一维流动渗透率。

单向饱和法理论计算公式如下:

$$K = \frac{L^2 \mu (1 - V_f)}{2pt} \quad (2)$$

$$V_f = \frac{\rho_a n}{\rho_f H} \times 100\% \quad (3)$$

式中,K为渗透率;p为注入压力;L为流动前沿距离;t

为充模时间; V_f 为纤维体积含量; ρ_a 为织物的面密度; ρ_f 为纤维的密度; n 为织物的层数; H 为织物的厚度。

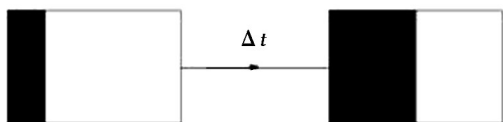


图1 单向饱和和试验法测量示意图

Fig.1 Measure diagram of unidirectional saturated flow method

径向法是通过透明上模观察和记录注射口在中心时,树脂在恒定流速或恒定压力下对纤维体的浸润过程,从树脂前沿的瞬时形状得出主渗透率的比值和主方向的渗透率。其理论计算公式如下:

$$K_x = \frac{\mu(1 - V_f) x_t^2}{4pt} \left[2\ln\left(\frac{x_t^2}{R_0^2}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$K_y = \frac{\mu(1 - V_f) y_t^2}{4pt} \left[2\ln\left(\frac{y_t^2}{R_0^2}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

式中, K_x 为沿 x 方向的渗透率; K_y 为沿 y 方向的渗透率; x_t 为 x 方向的流动前沿距离; y_t 为沿 y 方向的流动前沿距离; R_0 为注射口的半径。

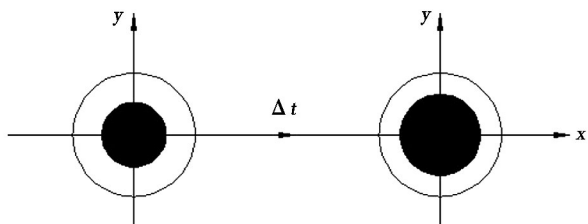


图2 径向法测量典型示意图

Fig.2 Typical measure diagram of radial flow method

以上两种测量方法主要是针对面内渗透率,对于铺层厚度较小时,可忽略厚度方向上的渗透。对于铺层结构相同的织物,二者所测的结果较接近,径向法所测得的结果要略小于单向法所测得的结果^[13]。但单向法数据收集和处理比较简单、准确。

随着预成型体厚度的增加,织物增强的构件不仅要测试面内渗透率,也需要研究 z 向的渗透率。其理论计算公式如下:

$$K = \frac{H^2 \mu (1 - V_f)}{2pt} \quad (6)$$

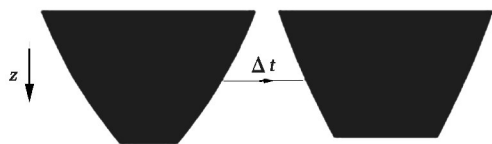


图3 z 向法测量示意图

Fig.3 Measure diagram of z -directional flow method

上述计算公式表明:对单向法而言,在纤维织物规格、树脂黏度、铺层层数和厚度以及压力等一致的情况下,流动前沿距离的平方值 x^2 与充模时间 t 是线性关系;对 z 向法而言,在纤维织物面重规格、树脂黏度以及压力等一致的情况下,流动前沿距离的平方值

H^2 与充模时间 t 是线性关系。根据 x^2 或 H^2 和 t 作图,根据直线斜率就可以比较渗透率的相对大小。

1.2 主要原材料

树脂基体:陶氏化学,环氧树脂体系 760E/766H; 增强材料:双轴向玻璃纤维缝编织物 EZF800-1(纱线 1), EZF800-2(纱线 2), EZF800-3(纱线 3), EZF800-3-1(纱线 3,线圈长度 1), EZF800-3-2(纱线 3,线圈长度 2), 航天材料及工艺研究所。

2 结果与讨论

2.1 测试方法分析

按照 GB/T17470—2007,测定三种双轴向织物的浸透速率,其结果见表 1。表 1 表明,标准靶环数字清晰可见且织物白色干丝束完全消失对应时间和 GB/T17470—2007 规定的以标准靶环数字清晰可见对应时间为取值结果并不完全一致,但两数据趋势基本一致;EZF800-1 和 EZF800-2 的渗透速率相近,而 EZF800-3 的渗透速率稍差。

表 1 三种双轴向织物实验结果¹⁾

Tab.1 Measure results of three kinds of biaxial stitching fabrics

织物	标准靶环数字清晰可见对应时间/s	标准靶环数字清晰可见且织物白色干丝束完全消失对应时间/s
EZF800-1	40	55
EZF800-2	39	56
EZF800-3	46	67

注:1)测试温度为 23℃。

2.2 单向法试验分析

采用单向法测量缝编织物的面内渗透率和浸透速率,目前还没有统一的测试规范。因此,在缝编织物渗透性能测试比较之前,首先需要确定试样状态和测试状态。

2.2.1 试样和测试状态的选定

试样状态应包括长、宽、层数和方向等,测试状态应包括材料温度、压力、试验装置及其工艺布局等。

试样状态中层数、方向的确定以及测试状态中材料温度、压力的确定应以叶片材料力学性能测试规范中相关内容为基准更为恰当。而试样长度、宽度的选择,以及试验装置及其工艺布局则需考虑进胶管的大小、压差的递减因素、克服初始效应和边缘效应等对渗透性能的影响。

综上所述,参考叶片材料力学性能测试规范,选定试样和测试状态如表 2 所示。

表 2 单向法试样和测试状态^[13-14]

Tab.2 Measure state of unidirectional saturated flow method

尺寸/mm	织物层数	环境条件	进胶口
300×200	6 层,纱线 3	25℃, 101.325 kPa	端部一侧

2.2.2 典型缝编织物单向渗透性能测试分析

采用选定的单向法测试比较了几种典型缝编织物的渗透性能情况,如图 4—图 7 所示。

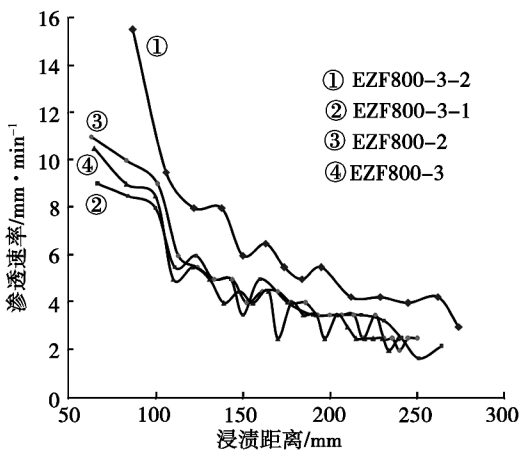


图4 几种织物的浸渍距离—渗透速率关系曲线
Fig. 4 Relationship of flow distance and permeability rate

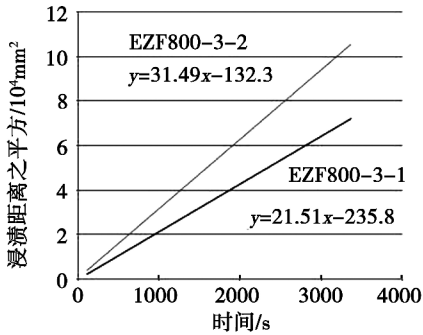


图5 不同线圈长度缝编织物的浸渍距离与时间关系
Fig. 5 Relationship of flow distance and time for different loop length

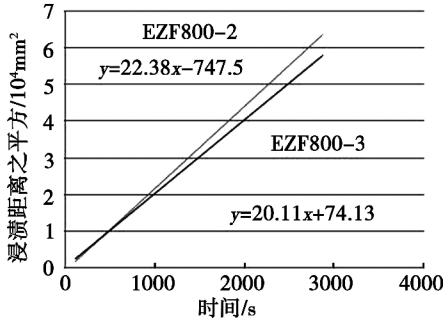


图6 不同纱线的缝编织物的浸渍距离与时间关系
Fig. 6 Relationship of flow distance and time for different fiber

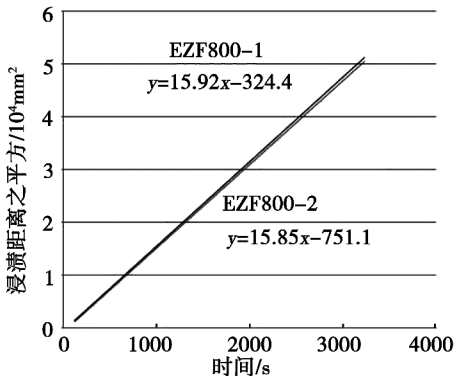


图7 21℃条件下不同纱线的缝编织物的浸渍距离与时间关系

Fig. 7 Relationship of flow distance and time for different fiber

图4表明:(1)织物的渗透速率随浸渍距离的增加逐渐减小,流动前沿压差逐渐降低应是主要原因;(2)渗透速率难以准确定量反映出不同织物之间的渗透性能。

图6—图8表明:浸渍距离平方—时间关系图是一直线,该图及其斜率能定量地比较出缝编织物的渗透性能。但是,织物的渗透率还需结合直线斜率、树脂黏度、纱线密度和织物面密度以及织物单层厚度等采用公式(2)和公式(3)来进行计算,见表3。

表3 几种织物的单向渗透率计算结果¹⁾

Tab. 3 Results of unidirectional permeability coefficient

织物	斜率/mm ² ·s ⁻¹	渗透率/ 10 ⁻⁶ mm ²
EZF800-3-1	21.5	9.0
EZF800-3-2	31.5	13.2
EZF800-2	22.4	9.0
EZF800-3	20.1	8.4

注:1) $V_f = 800 / (2.54 \times 0.5 \times 1000) = 0.63$, 树脂 25℃, 黏度 230 mPa·s。

由式(2)可知,若其他参数一致,则可直接采用直线斜率百分比来定量比较缝编织物渗透率大小。

织物渗透率由纤维的物理特性及纤维层的内部结构决定^[6],理论上与外界环境影响无关。但由于测试累积误差,导致不同条件下测试的结果有所差别。表4表明,由于直线拟合斜率和温度等因素造成的累积误差,同一织物的渗透率有近6%的差别。

表4 不同温度 EZF800-2 织物单向渗透率计算结果

Tab. 4 Results of unidirectional permeability coefficient at different temperature

温度/℃	斜率/mm ² ·s ⁻¹	黏度/mPa·s	渗透率/10 ⁻⁶ mm ²
25	22.4	230	9.0
21	15.8	295	8.5

2.3 z 向法分析

采用z向法测量缝编织物的层间渗透率,目前也还没有统一的测试规范。因此,在缝编织物渗透性能测试比较之前,同样首先需要确定试样状态和测试状态。

2.3.1 试样和测试状态的选定

采用z向法测量缝编织物的层间渗透率,应尽量减少织物面内渗透流动和边缘效应对测试结果的影响,此时试验工艺布局及织物层数、织物样品尺寸、导流网尺寸等相互之间的配合很重要,同时也要考虑尽量减少厚度方向压差递减因素对测试结果的影响。

综上所述,选定试样状态和测试状态见表5。

表5 z向法试样和测试状态

Tab. 5 Measure state of z-directional flow method

尺寸/mm	织物层数	环境条件	进胶口
织物:250×250 导流网:200×200	6-15, EZF800 (3-7.5 mm)	25℃、 101.325 kPa	试样上表面 中心位置

2.3.2 典型缝编织物 z 向渗透性能测试分析

对 EZF800-3 双向向缝编织物的渗透性能(渗透速率和渗透率)测试,结果见图 8、图 9 和表 6。结果表明,织物的 z 向渗透速率和渗透率明显低于单向法测试的对应渗透性能值,但反映的规律趋势一致。

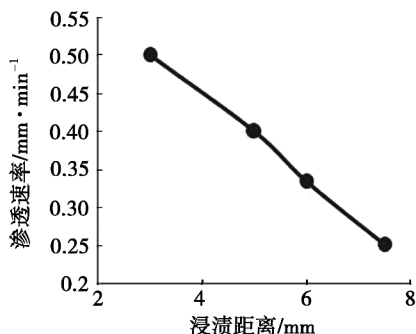


图 8 EZF800-3 织物的浸渍距离—渗透速率关系曲线
Fig. 8 Relationship of flow distance and permeability rate

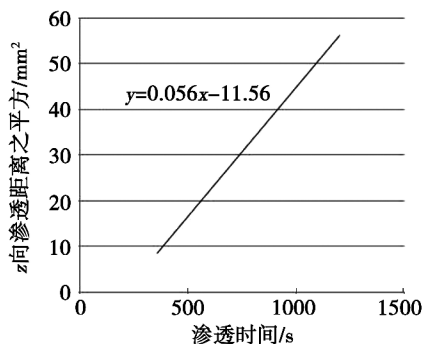


图 9 EZF800-3 织物渗透距离与渗透时间关系图
Fig. 9 Relationship of flow distance and time

表 6 EZF800-3 织物 z 向渗透率计算结果

Tab. 6 Results of z-directional permeability coefficient

温度/℃	斜率/mm ² ·s ⁻¹	黏度/mPa·s	渗透率/10 ⁻⁹ mm ²
25	0.056	230	23.5

2.4 风机叶片用缝编织物渗透性能测试评估方法

目前,大型风机叶片主体结构 and 部件(壳体、大梁或主梁帽、腹板等)的成型工艺基本是 VARI 工艺,对于少数结构和部件(内外粘接角等)则大都仍采用手糊工艺。因此,风机叶片用缝编织物的渗透性能测试评估应该有针对性地选择不同的测试方法。

采用 GB/T17470-2007 测试方法只能测试重力条件下的浸透速率,无法获得织物的特性参数——渗透率;采用单向法和 z 向法既能测试重力和真空压力条件下的渗透速率,又可获得织物的特性参数—单向渗透率和 z 向渗透率。

对于手糊工艺用缝编织物,可只参照采用 GB/T17470-2007 附录中玻璃纤维毡树脂浸透速率的测定办法来测试其相应浸透速率,直接以渗透速率来评估其渗透性能即可,而无需测其渗透率。

对于 VARI 工艺用缝编织物,则应需参考具体使用情况,选择单向法或 z 向法来测试其渗透速率和渗

透率,由于渗透速率的影响因素较多,用渗透率来定量评估其渗透性能则更为科学客观。上述结果表明,相同测试条件下,不同织物的渗透率的相对百分比与 x^2 或 H^2-t 关系图中的对应斜率比值是一致的。因此,可简化采用 H^2-t 关系图中的对应斜率比值来比较评估不同织物的渗透性能,而无需进一步计算其具体的渗透率值。

3 结论

(1)用渗透率值来评估风机叶片用缝编织物的渗透性能更为科学。

(2)不同测试条件下测试计算出的织物渗透率可能存在一定程度的误差,渗透率比较时应统一规范测试条件,数据才能更客观可取。

(3)应根据所采用的具体工艺和风机叶片上具体使用部位等特点来选择缝编织物的渗透性能评估参数和测试方法。

参考文献

- [1] George Marsh. Composites help improve wind turbine breed [J]. Reinforced Plastics, 2006(3):26-31
- [2] 高会焕. 纤维增强材料风机叶片发展概述 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(4):104-108
- [3] 张晓明. 风力发电复合材料叶片的现状和未来 [J]. 纤维复合材料, 2006(2):60-63
- [4] 刘洪政, 陈南梁. 多轴向经编增强柔性复合材料的发展及应用 [J]. 山东纺织科技, 2007, 48(1):53-56
- [5] 王洪燕, 张守斌, 潘福奎. 多轴向经编织物的性能及应用 [J]. 现代纺织技术, 2008(4):58-60
- [6] 蔡建强. 缝编织物复合材料的低成本制造及应用 [C]//第十四届全国复合材料学术会议论文集(下), 2006:1267-1271
- [7] 简抗抗, 张佐光, 顾铁卓, 等. 不同纤维堆积状态下饱和渗透率实验研究 [J]. 复合材料学报, 2006, 23(1):31-36
- [8] Parnas R S, Howard J G, Luce T L, et al. Permeability characterization part 1: a proposed standard reference fabric for permeability [J]. Polymer Composites, 1995, 16(6):429-445
- [9] Luce T L, Advani S G, Howard J G, et al. Permeability characterization part 2: flow behavior in multiple 2 layer performs [J]. Polymer Composites, 1995, 16(6):446-458
- [10] Parnas R S, Flynn K M, Da Favero M E. A permeability database for composite manufacturing [J]. Polymer Composites, 1997, 18(5):623-633
- [11] 李文晓, 薛元德, 吴人洁. 树脂传递模塑工艺中渗透率的测定 [J]. 建筑材料学报, 2000, 3(3):258-263
- [12] GB/T17470-2007《玻璃纤维短切原丝毡和连续原丝毡》
- [13] 梁晓宁. 叶片用经编织物的厚铺层结构渗透性能及 LCM 成型工艺研究 [D]. 东华大学, 2009
- [14] 高彦涛, 李炜, 罗永康. 工艺中多层玻纤织物渗透规律研究与工艺优化 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(6):54-57
- [15] 倪爱清, 蔡红涛, 王继辉. 真空灌注成型工艺中玻璃纤维毡渗透率的测量 [J]. 武汉理工大学学报, 2009, 3(4):67-70

(编辑 吴坚)