

风机叶片用玻璃纤维的渗透性研究^{*}

张 旻 秦泽云 李 慧 张彦飞 杜瑞奎 刘亚青

(山西省高分子复合材料工程技术研究中心, 中北大学材料科学与工程学院, 太原 030051)

摘要 通过单向法和径向法分别研究了两种牌号的纤维和树脂之间的渗透性能。结果表明, 恒石纤维具有更好的浸润和渗透性能, 并进一步探讨了不同树脂相对同一种纤维具有不同渗透率的原因。

关键词 风机叶片 玻璃纤维 渗透率 单向法 径向法 毛细效应

随着常规化石能源的日渐枯竭, 开发可持续发展的新能源提上日程。风能作为一种清洁的可再生能源, 其开发潜力已被世界各国所认可。作为风力发电装置最关键最核心的部件之一——叶片, 其设计与选材决定着风力发电装置的性能与功率, 是保证机组正常稳定运行的重要因素, 其成本也占到了风机设备的 20% ~ 30%^[1]。因此, 提高叶片的综合性能、降低发电成本对叶片的设计、选材及成型工艺提出了更高的要求。近年来, 越来越多的企业采用真空辅助树脂传递模塑(VARTM)技术来制作高品质的叶片。

VARTM 工艺是一种典型的液态复合材料成型工艺。运用数值模拟方法对 VARTM 工艺充模过程进行模拟, 分析树脂在增强材料中的流动行为, 设计工艺流程, 对解决 VARTM 工艺中因浸润不良而产生的产品缺陷, 提高工艺的可控制性有指导意义, 同时对复合材料制备技术的发展有积极的促进作用。而 VARTM 工艺中纤维预制体渗透率的准确测定, 是数值模拟中的关键问题之一^[2]。笔者通过单向法和径向法分别研究了两种牌号的纤维与树脂之间的渗透性能。

1 实验部分

1.1 原材料

环氧树脂(EP): LT-5078A, 固化剂的牌号 LT-5078B(胺类), 惠利环氧树脂(香港)有限公司;

EP: LY1564SP, 固化剂的牌号为 XB3485(胺类), 亨斯迈公司北京伊诺瓦科技有限责任公司;

恒石无碱玻璃纤维经编织物: 振石集团恒石纤维基业有限公司;

成如旦无碱玻璃纤维经编织物: 海宁成如旦基布有限公司。

1.2 仪器与设备

VARTM 模具: 自制, 其示意图如图 1、2 所示;

旋片式真空泵: 2XZ-4 型, 台州市椒江宏兴真

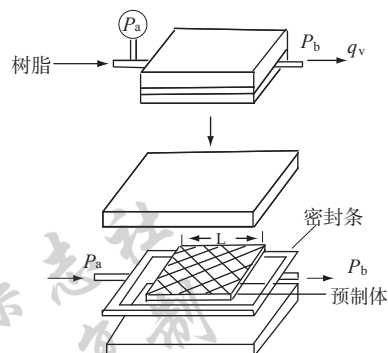


图1 单向法模具

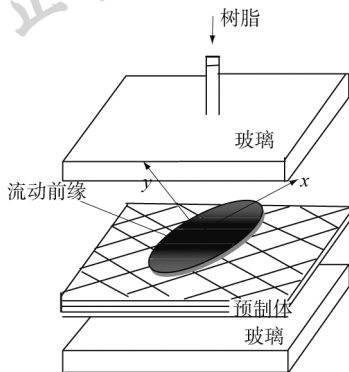


图2 径向法模具

空泵设备厂。

1.3 试样制备与表征

将惠利 EP 和固化剂按 100:30 的质量比, 亨斯迈 EP 和固化剂按 100:34 的质量比分别在常温下充分混合, 搅拌均匀。静置, 待其变清以后, 在真空压力下注入模具中。树脂沿着一定的流道在模具内流动, 每隔一定的时间(30 s, 60 s, 90 s……) 记录下其流动前沿, 并根据 Darcy 公式计算其渗透率。

2 结果与讨论

2.1 渗透率研究方法

研究 VARTM 工艺的充模过程有助于确定模具的注射口和排气口位置, 优化充模过程, 节省试验时

^{*} 山西省科技创新计划项目(2009101004)

收稿日期: 2011-03-28

间和成本,是 VARTM 模具设计中不可缺少的一个步骤^[3]。绝大多数 VARTM 充模模拟研究将充模过程视为牛顿流体在多孔介质中的渗流过程^[4],描述这一流动的最基本公式是 Darcy 定律。以 Darcy 定律作为流体的运动方程,其具体表达式如下:

$$Q = - \frac{K}{\eta} \nabla P$$

式中: Q ——流量, m^3/s ;
 K ——增强材料的渗透率, m^2 ;
 η ——树脂黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;
 ∇P ——压力梯度, Pa 。

渗透率的测量可分为面内测量和面外测量。一般研究的都是面内渗透率,各国研究人员所使用的方法主要有单向饱和流动法(简称单向法)、非饱和和径向流动法(简称径向法),并在此基础上提出了一些改进的方法,从一定程度上提高了渗透率值的精度和准确性^[5]。

单向法,如图 1 所示,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压力降,代入 Darcy 定律,可得一维主渗透率 K 。其表达为:

$$Q = \frac{KS}{\eta L} \Delta P = f(K) \Delta P$$
$$K = \frac{\eta L Q}{S \Delta P}$$

式中: S ——截面积, m^2 ;
 L ——流体通过的距离, m ;
 ΔP ——流体通过 L 长度时的压力差, Pa 。

径向法中树脂在织物内的流动形式如图 3 所示。由图 3 可知,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;同时用压力传感器测量注射口压力,代入 Darcy 定律,经过换算求出二维渗透率 K 。

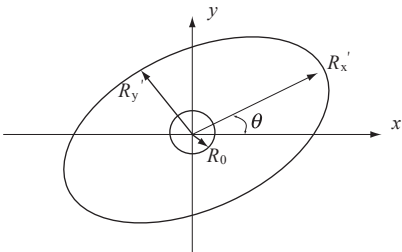


图3 径向法中树脂在织物内的流动形式

当树脂从半径为 R_0 的注入口流入各向异性织

物后,它以椭圆的形状向前浸润,流动前缘如图 3 所示,图中 $x-y$ 坐标系表示织物的经向和纬向,即材料坐标系, $x'-y'$ 为流动前缘椭圆长短轴所在的坐标系,即渗透率的主坐标系,两坐标系的夹角为 θ 。二维渗透率表达式如下:

$$k_x = \frac{\eta(1 - \varphi_f)x_t^2}{4(P_0 - P_a)t} [2\ln(x_t/R_0) - 1]$$
$$k_y = \frac{\eta(1 - \varphi_f)y_t^2}{4(P_0 - P_a)t} [2\ln(y_t/R_0) - 1]$$

式中: φ_f ——纤维体积分数, $\varphi_f = \frac{nG_f}{h\rho_g}$, n 为纤维布的层数; G_f 为纤维布的表面密度, g/m^2 ; ρ_g 为玻璃纤维的密度, g/m^3 ; h 为试样厚度, m ;

x_t, y_t —— t 时间树脂前沿在 x 和 y 方向与注射口的距离, m ;
 R_0 ——注射口的半径, m 。

2.2 不同纤维种类的影响

对于单向法,实验设计了 12 组交叉实验,采用两种树脂体系和两种牌号的纤维,并且每种牌号的纤维都有 3 种不同轴向的纤维布,以观察其流动规律,实验结果见表 1、表 2。

表 1 单向法测得的成如旦纤维的渗透率 $\times 10^{-9} \text{m}^2$

树脂	单轴 / 0°	双轴 / $\pm 45^\circ$	三轴 / ($0^\circ / -45^\circ / +45^\circ$)
惠利 EP	0.099 67	0.047 62	1.213 9
亨斯迈 EP	0.138 9	0.046 97	1.266 1

表 2 单向法测得的恒石纤维的渗透率 $\times 10^{-9} \text{m}^2$

树脂	单轴 / 0°	双轴 / $\pm 45^\circ$	三轴 / ($0^\circ / -45^\circ / +45^\circ$)
惠利 EP	0.151 2	0.055 13	1.532 6
亨斯迈 EP	0.146	0.055 02	1.346 3

从表 1 可以看出,对于同一种树脂体系,双轴、单轴、三轴纤维布的渗透率依次增大,彼此相差一个数量级。分析其原因为:双轴布为 $\pm 45^\circ$,而单轴布有顺着流动方向的 0° 纤维,这可能起到了引流作用;而相比于单轴布和双轴布,三轴布不但含有 0° 纤维,而且在两层 0° 纤维之间还含有松散的其它方向的纤维存在,增大了流动空隙,从而提高了其渗透性能。由于不同轴向的纤维提供了不同应力,因此不能简单地根据渗透率大小来取舍,应综合考虑产品受载荷情况。

由表 1 和表 2 可以看出,恒石纤维的渗透性能优于成如旦纤维,这可能与二者纤维结构差异和恒石纤维表面处理较好有关。因此,在成本差别不大的情况下,可以多选用恒石纤维,这样可以提高浸润

效果并减少成型时间。

同样的,对于径向法,也设计了同样的 12 组交叉实验,其结果如表 3、表 4 所示。

表 3 径向法测得的成如旦纤维的渗透率 $\times 10^{-9} \text{m}^2$

树脂	单轴 / 0°		双轴 / $\pm 45^\circ$		三轴 / ($0^\circ / -45^\circ / +45^\circ$)	
	k_y	k_x	k_y	k_x	k_y	k_x
惠利 EP	1.18	4.3	1.3	1.97	0.6	45.08
亨斯迈 EP	1.08	3.22	1.85	2.96	0.8	46.5

表 4 径向法测得的恒石纤维的渗透率 $\times 10^{-9} \text{m}^2$

树脂	单轴 / 0°		双轴 / $\pm 45^\circ$		三轴 / ($0^\circ / -45^\circ / +45^\circ$)	
	k_y	k_x	k_y	k_x	k_x	k_y
惠利 EP	1.35	7.69	1.1	1.61	0.87	68.17
亨斯迈 EP	1.46	8.46	2.69	3.44	1.12	67.7

由表 3、表 4 可以看出,在 x 轴方向,径向法的渗透率随纤维种类变化情况与单向法一致,都是双轴、单轴、三轴纤维布的渗透率依次增大,而垂直于 x 方向的 y 方向,整体情况正好相反。这是因为径向法中的树脂浸润椭圆的长轴方向,是主渗透率方向,其纤维分布和单向法完全一致,因而渗透率变化情况也相同;而 y 方向, x 轴的 0° 此时成为 y 轴的阻碍, 0° 对于 y 方向的流动完全起不到引流作用,相反的,还阻碍了树脂的流动,因此, y 方向纤维渗透率普遍偏小,含 0° 方向纤维多的单轴和三轴,此时不如没有 0° 纤维的双轴的渗透率高。

2.3 不同树脂的影响

同一种纤维,使用不同树脂体系,其渗透率会有略微差距,这种现象与 Darcy 定律相矛盾。因为根据 Darcy 定律,织物的渗透率应是织物本身的函数,与树脂无关,这说明还存在一些 Darcy 定律没有考虑的影响因素。笔者认为树脂与织物之间的微观浸润性是导致这种现象的原因。

在径向法中,树脂流过未浸润的纤维体,测得的渗透率称为瞬时(或非饱和)渗透率;而单向法中,树脂流过已浸润的纤维体,测得的渗透率相应地称为稳态(或饱和)渗透率。大多数研究者同时运用单向法和径向法来表征材料的渗透率,但在相同体积分数下,结果常不一致,瞬时渗透率通常低于稳态渗透率。两种结果有差别,其原因为模具变形和流道效应作用,但李文晓等^[6]进一步研究表明,主要是受毛细压力的影响。Lai Yenhuan 等^[7]首先对毛细压力的作用进行估测,并将 Darcy 定律中的压力差表示为:

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} - P_c$$

式中: P_{in} 、 P_{out} ——树脂注入口和排出口的压力, Pa;

P_c ——毛细压力, Pa。

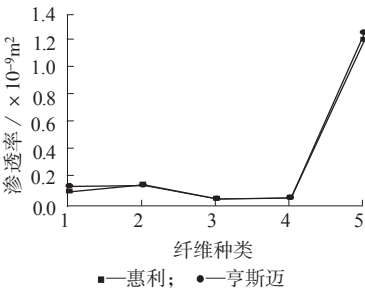
正是由于毛细压力的存在,导致不同树脂和纤维之间毛细压力不同,从而最终影响到压力差和渗透率。D. A. Steenkamer 等^[8]对表面张力和接触角的进一步测量结果表明,渗透率变化的原因是纤维和试验流体在微观水平上的相互作用。为此,笔者以恒石纤维为例,测试了其接触角等反映其微观浸润性的性能数据,结果如表 5 所示。

表 5 恒石纤维接触角测定

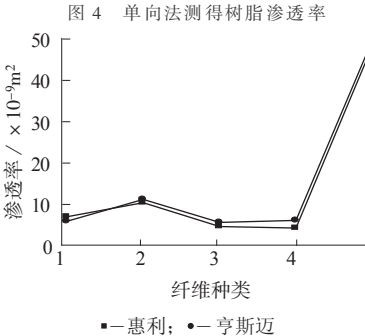
序号	惠利			亨斯迈		
	左接触角	右接触角	平均接触角	左接触角	右接触角	平均接触角
1	75.59	74.01	74.8	73.27	74.16	73.71
2	70.62	70.62	70.62	77.32	74.61	75.96
3	76.09	73.74	74.92	70.31	74.2	72.26
4	74.24	72.27	73.25	66.46	74.17	70.31
平均	74.135	72.66	73.3975	71.84	74.285	73.06

从表 5 可以看出,同种纤维对不同树脂的浸润性的确不同,这导致了渗透率测量时的差异。浸润不佳的试验流体在外界压力的作用下渗入纤维束,这样便导致了渗透率的减小。

图 4、图 5 分别为单向法和径向法测得的树脂渗透率。从表 1、表 2 和图 4、图 5 的对比中发现,单向法中不同纤维之间的渗透率差别较小,而径向法中,则差别较大。



1—成如旦单轴 / 0° ; 2—恒石单轴 / 0° ; 3—成如旦双轴 / $\pm 45^\circ$;
4—恒石双轴 / $\pm 45^\circ$; 5—成如旦三轴 / ($0^\circ / -45^\circ / +45^\circ$)



1—成如旦单轴 / 0° ; 2—恒石单轴 / 0° ; 3—成如旦双轴 / $\pm 45^\circ$;
4—恒石双轴 / $\pm 45^\circ$; 5—成如旦三轴 / ($0^\circ / -45^\circ / +45^\circ$)

图 5 径向法测得树脂渗透率

从充模流动的机理上分析, 充模流动可分为纤维束之间的宏观流动和纤维束内的微观流动两种, 前者由充模压力控制, 后者主要受毛细作用的影响, 两者流速不尽相同。微观流动对已饱和区的影响甚微, 可以忽略不计, 但是在流动前沿区, 纱束被横向浸润, 纱束内的树脂流动滞后, 使得测得的未饱和区渗透率值低于饱和区。对于单向法来说, 渗透率测的主要是已饱和区的值, 因而其随树脂种类变化较小; 而对于径向法来说, 其渗透率主要测的是流动前沿的非饱和区, 此处可能更容易受到树脂浸润的影响, 因而不同树脂体系对其影响较大。故在稳态试验(单向法)中条件近似的不同试验流体的测量值可相互替代, 在非饱和试验(径向法)中则测量值差异较大。

3 结 论

(1) 对于同一种树脂, 恒石纤维的渗透性优于成如旦纤维。因此, 在成本差别不大的情况下, 可以适当多选用恒石纤维, 这样可以提高浸润效果并减少成型时间。

(2) 对于同一种纤维, 使用不同树脂体系, 其渗透率有微小差距。树脂与织物之间的微观浸润性是

导致这种现象的原因。

(3) 在稳态试验(单向法)中条件近似的不同试验流体的测量值可相互替代, 在非饱和试验(径向法)中则测量值差异较大。

参 考 文 献

- [1] 李成良, 王继辉, 薛忠民. 大型风机叶片材料的应用和发展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008(21): 328 - 336.
- [2] 杨云飞. 纤维预制体渗透率测定方法及影响因素的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [3] 陈萍, 李宏运, 陈祥宝. 铺层方式对织物渗透率的影响[J]. 复合材料学报, 2001, 18(1): 30 - 33.
- [4] 李海晨, 张明福, 王彪. RTM 工艺增强纤维渗透率测量方法研究[J]. 航空材料学报, 2001, 21(1): 51 - 54.
- [5] 范晓琴, 吴晓青. RTM 工艺中纤维渗透率的研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(3): 44 - 49.
- [6] 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.
- [7] Lai Yenhua, Khomami B, Kardos J L. Accurate permeability characterization of preforms used in polymer matrix composite fabrication processes[J]. Polymer Composites, 1997, 18(3): 368 - 377.
- [8] Steenkamer D A, Mcknight S H, Wilkins D J, et al. Experimental characterization of permeability and fiber wetting for liquid molding[J]. Journal of Material Science, 1995, 30(12): 3207 - 3215.

STUDY ON PERMEABILITY OF GLASS FIBER USED FOR WIND TURBINE BLADES

Zhang Yang, Qin Zeyun, Li Hui, Zhang Yanfei, Du Ruikui, Liu Yaqing

(The Research Center for Engineering Technology of Polymeric Composites of Shanxi Province, College of Material Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT The permeability difference between two brands of fibers and resins was studied by unidirectional and radial methods. The results showed that Heng Shi fiber had better infiltration and permeability, and the possible causes of different permeability between the different resins relative to the same fiber were explored.

KEYWORDS wind turbine blades, glass fiber, permeability, unidirectional method, radial method, capillarity effect

欢迎查询有关广告

对于在我刊刊登的所有广告, 如读者需要查询更详细的资料或了解情况, 请填好《读者查询广告资料服务卡》后寄回或来函。本杂志社将为您提供或转请有关单位提供资料, 以满足您的要求。如需购买任何广告单位的材料、设备、仪器及配件等产品, 我社将帮助您联系, 以保证产品质量, 争取优惠价格。欢迎各单位在我刊刊登广告。刊登办法函索即寄。

《工程塑料应用》读者查询广告资料服务卡

No. _____

读者姓名 _____ 单位 _____ 邮政编码 _____

通讯地址 _____ 电话 _____ E-mail: _____

欲获得《工程塑料应用》_____ 年第 _____ 期第 _____ 页 _____

广告中有关 _____ 的详细资料。

如空位不够, 请另附纸。填好后请寄回。

山东省济南市 108 信箱杂志社

邮政编码: 250031