

织物预成型体毛细作用研究

Study on Capillary Pressure of Fabric Preforms

于育强^{1,2}, 张佐光¹, 唐邦铭², 梁子青²

(1 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083;

2 北京航空材料研究院 先进复合材料国防科技重点实验室, 北京 100095)

YU Yu-qiang^{1,2}, ZHANG Zu-guang¹, TANG Bang-ming², LIANG Zi-qing²

(1 School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2 National Key Laboratory of Advanced Composites, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 研究了不同定型剂含量、纤维体积分数的三种织物的毛细作用, 运用达西定理由非线性回归法得到了纤维织物的毛细压力和渗透率的解析值。并由实验结果分析了定型剂含量、纤维体积分数对不同种类织物的浸润的影响规律。研究表明: 织物的毛细渗透速度主要是由毛细压力决定; 在本实验范围内渗透率随 V_f 的增加而线性下降, 而毛细压力和渗透速度随 V_f 的增加呈现了一个先减小后增大的过程; 定型剂的加入使织物的毛细压力减小, 使 SW280 和 3186 两种缎纹布渗透率略有减小而 G827 单向布的渗透率增大。

关键词: 预成型体; 渗透率; 毛细压力; 定型剂

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006)06-0020-04

Abstract: The capillary experiments of three different kinds of fabrics with different tackifier contents and volume fraction of fibers (V_f) were conducted. The analytical values of capillary pressure and fiber permeability were estimated by non-linear regression method based on Darcy's law. The effects of the tackifier and V_f on the wicking performance in these three different kinds of fabrics were investigated from the experimental data. The experimental data suggest that the permeating rate is mainly decided by capillary pressure, the permeability of these three kinds of fabrics decreased linearly with V_f in this experimental range of V_f , the permeating rate and capillary pressure decreased with the increase of V_f before V_{fc} but increased with the increase of V_f after V_{fc} ; the introduction of tackifier reduced the capillary pressure of fabrics but its effect on permeability depends on the architectures of fabrics.

Key words: fabric preforms; permeability; capillary pressure; tackifier

随着先进复合材料在国防军事领域及民用工业中的广泛应用, 对其性能/成本比的要求也越来越高。目前, 国际复合材料领域一直致力于研究高性能复合材料的低成本制造技术。研究低成本的成型方法能从根本上解决这一问题, 在众多的降低成本的成型方法中, 结合各种织物预成型技术的液态成型方法 (Liquid Composite Moulding, LCM) 是目前公认的具有低成本潜力的成型方法之一。

LCM 工艺与其他复合材料成型工艺的本质区别在于 LCM 工艺纤维/树脂的浸润是由低粘度的树脂在闭合模腔中流动渗入增强材料预成型体并排出织物中的气体而完成纤维/树脂浸润的。树脂在织物中的流动主要从两个水平推进, 压力梯度决定浸润或宏观流动前峰(在纤维束之间进行)的流速; 而毛细管压

力和表面张力则决定浸透或微观流动前峰(在纤维束内部进行)的流速, 如果浸润和浸透的流动前峰不一致, 就可能产生气泡, 流动前峰一旦汇合, 就很难排出包裹的空气^[1]。

当纤维体积分数很高和注射速度很低^[2-4]时, 由毛细作用决定的微观流动起主导作用, 决定着复合材料制品的质量。目前, 达西定理已广泛应用于建立 LCM 各种工艺中的树脂流动模型, 而采用达西定理分析树脂的微观流动必须首先知道纤维束的渗透率和毛细压力的大小^[5]。国外学者提出了多种理论和公式来预测纤维束渗透率和毛细压力, 其中最常用的是预测毛细压力的 Young-Laplace 方程和预测渗透率的 Kozeny-Carman 方程。

目前国内外关于毛细作用的相关研究主要集中在

纤维束的轴向渗透研究^[3-8],关于织物的毛细作用研究还比较少,本工作集中研究了定型剂含量、纤维体积分数对 SW280, G827, 3186 三种织物毛细作用的影响。

1 实验

1.1 实验材料

(1) 渗透液

荧光液: 密度为 920kg/m^3 , 室温粘度为 0.016Pa

s 。

(2) 增强材料

SW280: 南京玻璃纤维研究院, 面密度为 280g/m^2 , 名义厚度为 0.2mm ;

G827: 日本东丽公司, T300 碳纤维单向织物, 面密度为 167g/m^2 ;

3186: 法国 Porchure 公司, T300 碳纤维 8 缎纹织物, 面密度为 370g/m^2 。

(3) 定型剂

ES-T321: 北京航空材料研究院。

1.2 实验方法

本研究采用自制的实验设备进行毛细作用渗透的测定, 首先将织物按一定的尺寸裁好, 铺在模具内, 通过调节模具的型腔厚度和纤维层数来控制纤维体积分数, 通过观察窗口读取不同时刻浸润液的渗透高度。

2 渗透率和毛细压力的解析

在流体对织物的毛细渗透过程中, 毛细压力是渗透驱动力, 满足多孔介质渗透普遍规律 Darcy 定律^[3]。渗透过程中只有毛细压力及液柱产生的阻力, 无机械外压, 液体渗透高度与时间关系由织物结构中的孔隙等因素控制, 液体渗透速度是驱动力微分的函数, 可由式(1)表示:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k}{\eta} \frac{dP}{dh} = \frac{K}{h} \frac{P_c - \rho g h}{h} \quad (1)$$

式中: k , $\frac{dP}{dh}$, P_c , ρ , g 分别为织物的渗透系数 (m^2), 渗透流程上的压力梯度 (Pa/m), 渗透液体的粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), 孔隙率, 毛细压力 (Pa), 渗透液密度 (kg/m^3) 及重力加速度 (m/s^2)。

由式(1)可以通过多种方法进行处理得到毛细压力和渗透率的解析值。

2.1 积分 二元线性回归法

将式(1)重排并进行两端积分有:

$$\frac{h^2}{2} = \frac{K}{\rho g} (P_c - \rho g h) dt = \frac{K}{\rho g} P_c t - \frac{K}{\rho g} h(t) dt + C \quad (2)$$

由式(2)可见, 同一时刻 t , h^2 , $h(t) dt$ 呈二元线性关系, 由 $h^2/2(Y)$, $t(X_1)$, $h(t) dt(X_2)$, 按式(3)进行二元线性回归。

$$Y = AX_1 + BX_2 + C \quad (3)$$

其回归的线性参数 A, B 则有如下关系。

$$A = \frac{KP_c}{\rho g}, B = -\frac{K}{\rho g} \quad (4)$$

通过式(4), 代入 P_c , ρ , g 的值, 可解出 P_c 及 K 值。

2.2 非线性回归法

对式(1)两边进行积分, 得

$$t = -\frac{P_c}{K \rho g^2} \ln\left(1 - \frac{\rho g h}{P_c}\right) - \frac{h}{K \rho g} \quad (5)$$

根据 $h-t$ 曲线数据采用 ORIGIN 软件进行拟合直至曲线和实验结果最为接近, 此时的 P_c 和 K 值即为毛细压力和渗透率的值。

3 结果与讨论

由实验可得到定型剂含量分别为 0 和 4% 的不同纤维体积分数 (V_f) 的三种纤维布的毛细实验的渗透高度与时间的关系, 如图 1-3 所示。

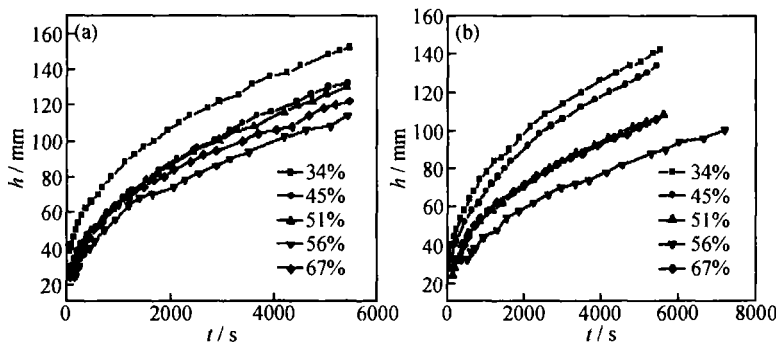


图 1 定型剂含量为 0 (a) 和 4% (b) 的 SW280 不同 V_f 时的毛细实验结果

Fig. 1 Capillary experiments of SW280 with different V_f and tackifier contents (a) 0 tackifier; (b) 4% tackifier

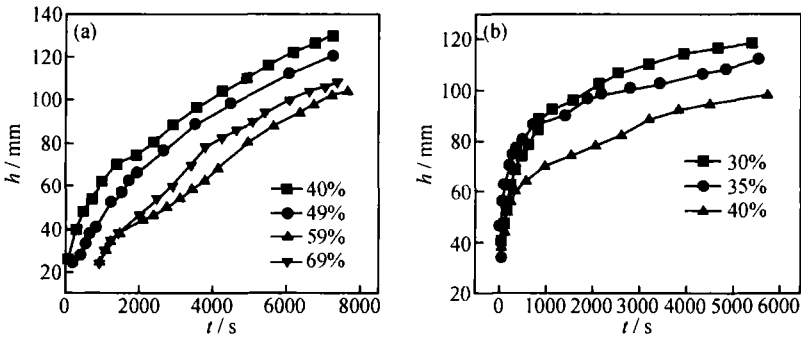


图 2 定型剂含量为 0(a) 和 4% (b) 的 G827 不同 V_f 时的毛细实验结果

Fig. 2 Capillary experiments of G827 with different V_f and tackifier contents (a) 0 tackifier; (b) 4% tackifier

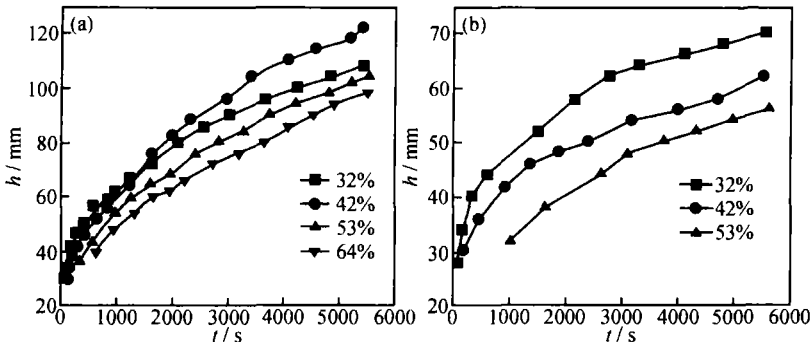


图 3 定型剂含量为 0(a) 和 4% (b) 的 3186 不同 V_f 时的毛细实验结果

Fig. 3 Capillary experiments of 3186 with different V_f and tackifier contents (a) 0 tackifier; (b) 4% tackifier

由于织物是表面状态均匀的近似多孔均质材料, 忽略织物细观的结构差别, 可以认为在织物的实验过程中毛细压力基本恒定, 毛细渗透过程的驱动力实际是恒定毛细压力与液柱压力之差, 随着渗透高度的增加, 垂直放置的织物中液柱高度产生的阻力越大, 总体上渗透压力会越来越小。实验的毛细渗透过程即是在

这种逐渐减小的压差作用下的渗透过程, 因此浸润速度随着时间的延长逐渐减小。

由于达到渗透平衡需要极长的时间^[3-5,8], 所以采用织物在较长时间时的渗透高度作为平衡高度进行比较, 图 4 所示为定型剂含量为 0 和 4% 的三种织物在 5000s 时的渗透高度对比。

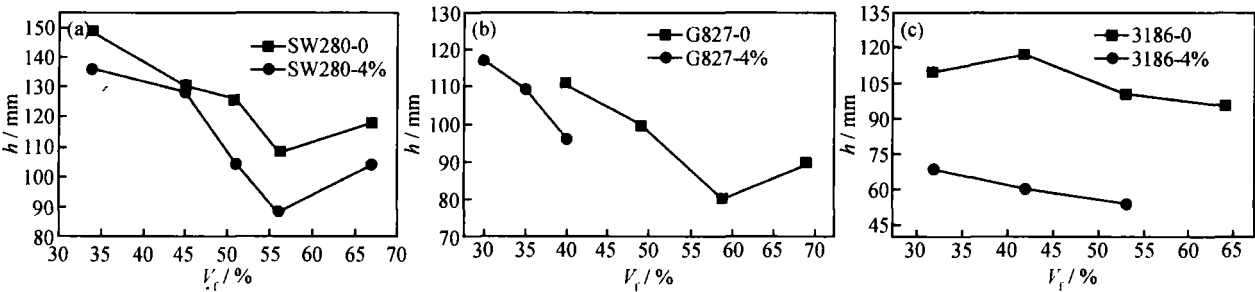


图 4 不同定型剂含量、 V_f 的三种织物在 5000s 时渗透高度对比 (a) SW280; (b) G827; (c) 3186

Fig. 4 Comparison of permeating heights of three kinds of fabrics with different V_f and tackifier contents at 5000s (a) SW280; (b) G827; (c) 3186

由图 4 可见: 加入了定型剂之后三种织物的渗透速度都有所下降; 总体而言三种织物的渗透速度在 V_f 较低时随 V_f 增加而下降, 但从 SW280 和 G827 的空白织物的结果可以看到当 V_f 增加到一定程度时渗透

速度开始随着 V_f 的增加而上升, G L Batch^[8] 在 V_f 为 39% ~ 59% 的范围内也观察到了渗透速度随 V_f 的升高下降的结果, 张佐光等^[7] 也观察到平衡高度随 V_f 的增加出现了一个先下降后上升的过程, 若将渗透速度

最低时的 V_f 称为临界体积分 V_{fc} , 则可以知道不同体系的 V_{fc} 是不同的。

为了分析产生此现象的原因必须对织物的毛细压力和渗透率进行解析, 因为液体在纤维织物中的渗透与毛细压力和渗透率有很大关系。

分别采用积分二元线性回归法和非线性回归法都可以得到毛细压力和渗透率的值且都能很好的对 $h-t$ 曲线进行拟合, 但两种方法拟合得到的结果有较大差别, 如表 1 所示为两种方法对于 3186 空白织物渗透率的拟合值的对比。

由表 1 可见非线性回归法的拟合结果比积分二元线性回归法的结果大很多, 而渗透率的差别又使毛细压力的拟合结果产生差别, 后者的毛细压力拟合结果比前者大很多, 由于毛细压力较难测定为了确定哪种方法的拟合值更符合实际, 将渗透率拟合结果与高娟娟^[9] 对 3186 的空白织物采用单向饱和和流动法进行了渗透率实验结果进行了对比, 结果如表 1 所示。由结果可见非线性回归法的拟合值很接近单向饱和流动法的测定值, 故该法对毛细实验 $h-t$ 曲线的拟合结果比较可靠, 采用此法对毛细实验 $h-t$ 曲线进行拟合。

表 1 3186 空白织物渗透率的实验值与两种拟合方法的拟合结果对比

Table 1 Comparison of experimental data of permeability of 3186 with no tackifier with its analytical values fitted with two different fitting methods				
V_f	32%	42%	53%	64%
Results of binary linear regression method	1. 81E-11	8. 23E-12	5. 00E-12	6. 38E-12
Results of non-linear fitting method	7. 06E-11	6. 78E-11	4. 44E-11	2. 91E-11
Results of rectilinear flow method experiment	-	7. 35E-11	6. 31E-11	2. 29E-11

3.1 毛细实验中渗透率的变化规律

三种织物不同定型剂含量不同 V_f 时的渗透率拟合结果及线性拟合关系见图 5 所示。

由图 5 可见三种织物的渗透率在本实验的 V_f 范围内随着 V_f 的增大线性下降, 还可以看到定型剂的加入对三种织物的渗透率由不同的影响规律: SW 280 和 3186 这两种缎纹布的渗透率随定型剂含量的增大略有下降; 而 G827 单向布的渗透率则随着定型剂的加入而有所增大。

定型剂的加入一方面填充了纤维的空隙而降低了织物的空隙率从而使渗透率减小; 另一方面定型剂的集束作用使得纤维束间空隙增大在更有利于渗透从而使渗透率增加。对于缎纹布前者起主导作用而对于单

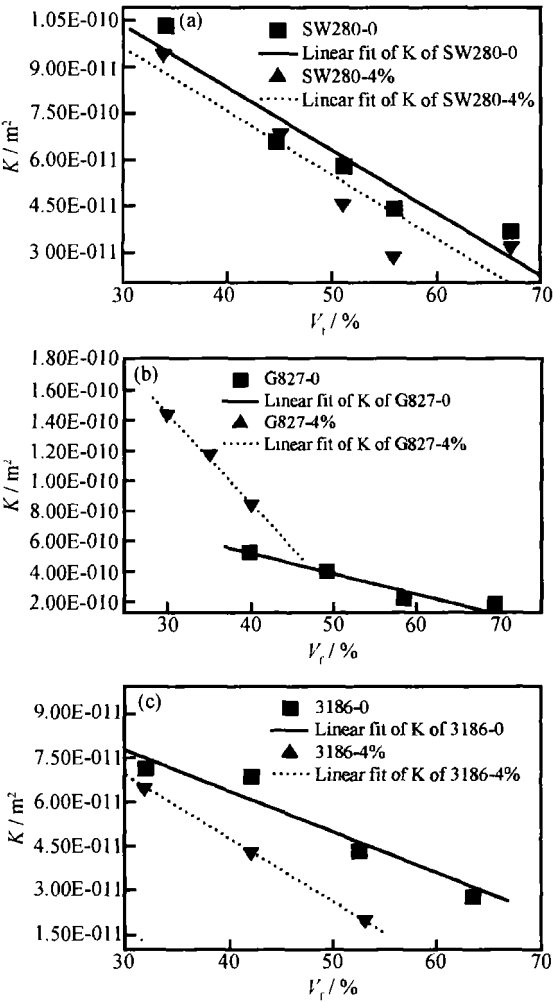


图 5 三种织物不同定型剂含量不同 V_f 时的渗透率及线性拟合 (a) SW 280; (b) G827; (c) 3186
Fig. 5 Permeability and its linear fit of three kinds of fabrics with different V_f and tackifier contents (a) SW280; (b) G827; (c) 3186

向布后者起主导作用。

3.2 毛细实验中毛细压力变化规律

三种织物不同定型剂含量不同 (V_f) 时的毛细压力的拟合结果见图 6 所示。由图 6 很明显可以看到毛细压力随 V_f 的变化规律与渗透速度随 V_f 的变化规律极其相似, 呈现了一个先减小后增大的过程。在此就可以很清楚地看到毛细渗透的速度主要是由毛细压力决定, 毛细渗透速度与毛细压力的变化规律一致: 在临界体积分 V_{fc} 之前随 V_f 的增大而减小而在 V_{fc} 之后则随 V_f 的增加而增大。

由图 6 还可以看到: 定型剂的加入使织物的毛细压力减小。原因如下: 用定型剂对纤维织物进行处理会改变织物的表面状态, 这种表面状态的改变不仅会引起织物的力学状态的改变, 而且由于表面能量状态 (下转第 32 页)

[17] FREEMAN R B. Hollow reinforced fiber structure formed by resin transfer molding [P]. United States Patent Application: US4808362, 1989-02-28.

[18] HARSHBERGER J, ROBERT L, OLSEN, et al. Isostatic pressure resin transfer molding[P]. United States Patent: 5, 863, 452, 1999-01-26.

[19] 曾竟成. 软模辅助 RTM 整体成型复杂结构复合材料构件技术查新报告[R]. 长沙: 湖南省科技信息研究所, 2004.

收稿日期: 2005-08-08; 修订日期: 2005-11-10

作者简介: 曾竟成(1962-), 男, 教授, 主要从事聚合物基复合材料研究, 联系地址: 国防科技大学一院五系 502 教研室(410073)。

(上接第 23 页)

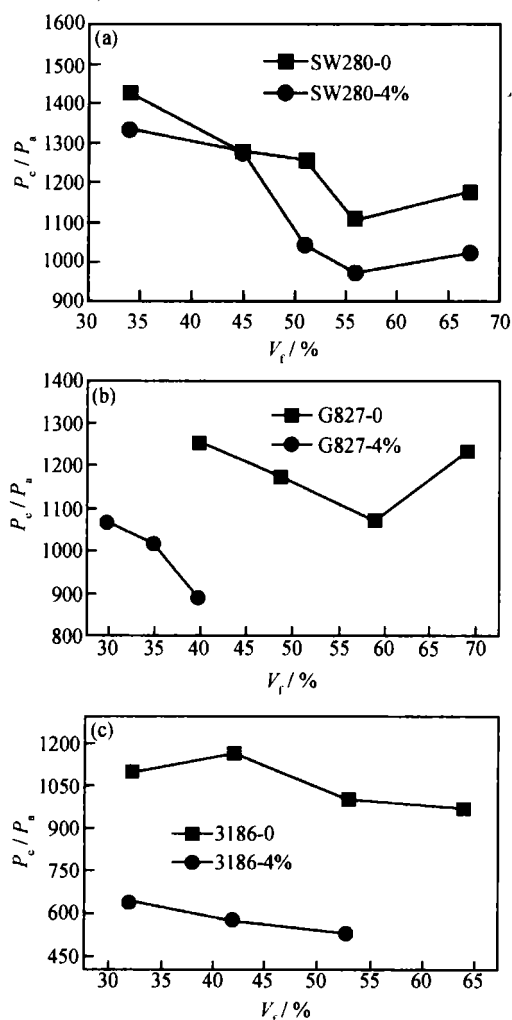


图 6 三种织物不同定型剂含量不同 V_f 时的毛细压力 (a) SW280; (b) G827; (c) 3186

Fig. 6 Capillary pressure of three kinds of fabrics with different V_f and tackifier contents
(a) SW280; (b) G827; (c) 3186

的改变, 导致表面张力以及与渗透液的接触角改变, 从而使毛细压力降低; 集束作用也使束内空隙减小导致毛细压力增大, 但是由于表面状态的影响起主导作用所以毛细压力总体上仍然降低。

4 结论

(1) 采用非线性回归法分析 $h-t$ 曲线能得到比较可靠的毛细压力和渗透率值。

(2) 织物的毛细渗透速度主要是由毛细压力决定而与渗透率的关系不大。

(3) 本实验渗透率随 V_f 的增加而线性下降, 毛细压力和渗透速度在临界体积分数 V_{fc} 之前随 V_f 的增大而减小而在 V_{fc} 之后则随 V_f 的增加而增大。

(4) 定型剂的加入使织物的毛细压力减小, 使 SW280 和 3186 两种缎纹布渗透率略有减小而 G827 单向布的渗透率增大。

参考文献

- [1] C D 拉德著. 王继辉译. 复合材料液体模塑成型技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] AMICO S, LEKAKOU C. An experimental study of the permeability and capillary pressure in RTM [J]. Composites Science and Technology, 2001, 61: 1945-1959.
- [3] AMICO S, LEKAKOU C. Axial impregnation of a fiber bundle. Part 1: Capillary experiments [J]. Polymer Composites, 2002, 23(2): 249-263.
- [4] AMICO S, LEKAKOU C. Mathematical modelling of capillary micro-flow through woven fabrics [J]. Composites, 2000, 31: 1331-1344.
- [5] 谭华, 祝颖丹. 单根纤维束轴向渗透研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2003, (23) 5: 1-4.
- [6] AMICO S, LEKAKOU C. Axial impregnation of a fiber bundle. Part 2: Theoretical Analysis [J]. Polymer Composites, 2002, 23(2): 264-273.
- [7] 张佐光, 李敏, 孙志杰, 等. 单向纤维集束的树脂浸润影响因素 [J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(10): 934-938.
- [8] BATCH G L. Capillary impregnation of aligned fibrous beds: Experiments and model. [J]. Reinforced Plastics and Composites, 1996, 15: 1027-1051.
- [9] 高娟娟. 复合材料预成型体特性表征 [D]. 北京: 北京航空航天大学硕士学位论文, 2006.

收稿日期: 2005-11-10; 修订日期: 2006-03-20

作者简介: 于育强(1981-), 男, 硕士, 主要从事复合材料液体成型工艺的应用研究工作, 联系地址: 北京航空航天大学材料科学与工程学院 104 教研室(100083)。