复 合 材 料 学 报 第22卷 第5期 10月 2005年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 22 No. 5 October 2005

文章编号: 1000-3851(2005)05-0083-06

# 纤维堆积体厚度方向浸渗特性

罗慧珍, 张佐光*, 李 敏
(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

**摘 要**: 使用自行设计的夹具对纯树脂沿纤维织物厚度方向的毛细浸渗行为进行了初步研究。通过改变温度、纤维体积分数、纤维类型以及铺层方式, 研究了树脂对纤维织物的毛细浸渗规律, 并研究了纤维表面浸润剂的影响。结果表明: 升高温度和减小纤维含量均有利于提高浸渗速率; 而铺层方式的改变对浸渗规律的影响甚小。

**关键词**: 复合材料; 浸润; 纤维; 树脂; 毛细作用
**中图分类号**: TB 332 **文献标识码**: A

# CAPILLARY IMPREGNATION IN THE TRANSVERSE DIRECTION OF FIBER BEDS

LUO Huizhen, ZHANG Zuoguang*, LI Min
(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Capillary impregnation of pure resins in the transverse direction of unidirectional cloth beds was studied elementarily by using self-designed fiber holder. The effect of experiment parameters, such as temperature, fiber volume fraction, fiber types and the stacking orientation of unidirectional cloth on the velocity of the capillary impregnation was investigated. And the impregnation of the unidirectional cloth without sizing on the surface was tested. In comparison with the cloths with sizing, the capillary impregnation velocity of clothes without sizing appears to be much quick. The results show that increasing the temperature and decreasing the fiber volume fraction can both improve the velocity of impregnation. However, changing the stacking orientation of the unidirectional cloth has little influence on the impregnation behavior.

Keywords: composites; impregnation; fibers; resins; capillary

对毛细作用驱动下的粘性流体渗入多孔介质的研究早在本世纪初就已经开展了。这种类型的流动在很多工业领域中都有着重要的作用, 例如染色、造纸、石油及纺织工业。近来, 它在复合材料制造领域中的重要性也逐步得到了重视, 其对于不饱和渗透率的准确测定有着重要意义[8~12]。树脂在纤维束中的这种流动在很大程度上是由毛细压力驱动的, 从原理上来说与流体渗入多孔介质的情况非常类似。目前, 研究方向主要集中在平行纤维集束方向的浸润上, 测试方法是应用芯吸原理测定浸润高度或浸润质量随时间的变化[1~7], 这两种测试方法在技术上具有一定的等效性[5]。而对于树脂垂直纤维方向的一维流动研究却非常少, Krishna M. Pillai 等采用短切纤维组成集合体进行研究比较了不同模型的适用性[6]; Gibson L. Batch 等通过将纤维束缠绕于一根圆柱上进行浸渗研究[7]。这些实验中采用的增强材料都是纤维束, 而且都存在着边缘效应的影响。在本文中使用特殊设计的、可忽略边缘效应的纤维夹具对多种纤维织物的堆积体进行了厚度方向的浸渗实验。

## 1 实 验

### 1.1 原材料

实验采用了下面两种纤维织物: 单向玻璃纤维织物SGFW430, 面密度为456 g/m$^2$; 单向碳纤维织物T300, 面密度为300 g/m$^2$。纤维织物裁剪成

收稿日期: 2004-11-15; 收修改稿日期: 2005-01-17
基金项目: 国家973项目(2003CB615602)和国家863项目(2001AA335020)
通讯作者: 张佐光, 教授, 博士生导师, 主要从事先进树脂基复合材料的研究 E-mail: zgzhang@buaa.edu.cn

一定尺寸，表面浸润剂的去除采用丙酮萃取法，并在干燥器中放置备用。浸润液体用环氧618 树脂(E-51)，$\rho$= 1.167 g/m$^3$，无锡迪爱生环氧有限公司。

### 1.2　浸润规律

将纯环氧618 树脂恒定在某一需要的温度。将一定层数已裁剪的纤维织物按照一定铺层方式放置于夹具中，然后把夹具水平悬挂在树脂容器的上方。通过精密升降台调节容器的高度，直至液面与纤维织物的下表面接触。采用本实验室自行设计的浸润测试仪，通过高精度分析电子天平实时记录浸渗过程中吸入的树脂质量。

对实验中所使用的单向纤维织物采用了两种铺层方式——单向铺层和正交铺层，其排列示意图见图1。

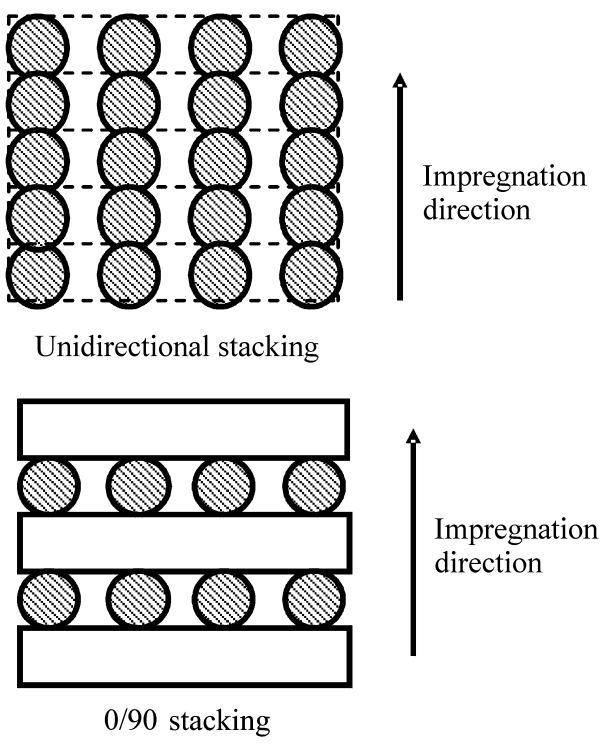


图1　单向纤维织物铺层方式示意图

Fig. 1　Schematics of the stacking of unidirectional cloths

表1 中列出了研究所用各种织物不同铺层形式的编号及其对应方式。

表1　单向织物铺层形式的编号

Table 1　Serial number of the stacking of unidirectional cloths

| Serial number | Stacking sequence |
|---|---|
| TCF-L | Unidirectional plying of unidirectional carbon cloth |
| TCF-T | 0/90 plying of unidirectional carbon cloth |
| SGF-L | Unidirectional plying of unidirectional glass cloth |
| SGF-T | 0/90 plying of unidirectional glass cloth |

## 2　结果与讨论

本实验研究的是液体沿纤维织物堆积体厚度方向的一维流动规律，必须首先验证自行设计的夹具是否能够满足要求。为此使用添加固化剂的树脂对体积分数约为50 % 的单向碳纤维织物进行了浸渗实验并制备金相试样，在显微镜下进行观察。结果表明：树脂沿纤维织物厚度方向的浸渗基本上可以假定是一维流动。

### 2.1　温度对浸渗的影响规律

树脂的粘度对其在纤维织物堆积体中的浸渗有着重要的影响，它关系到浸渗过程中粘滞阻力的大小。用旋转粘度仪测得的纯618 树脂在各恒定温度下的粘度的结果如图2 所示。

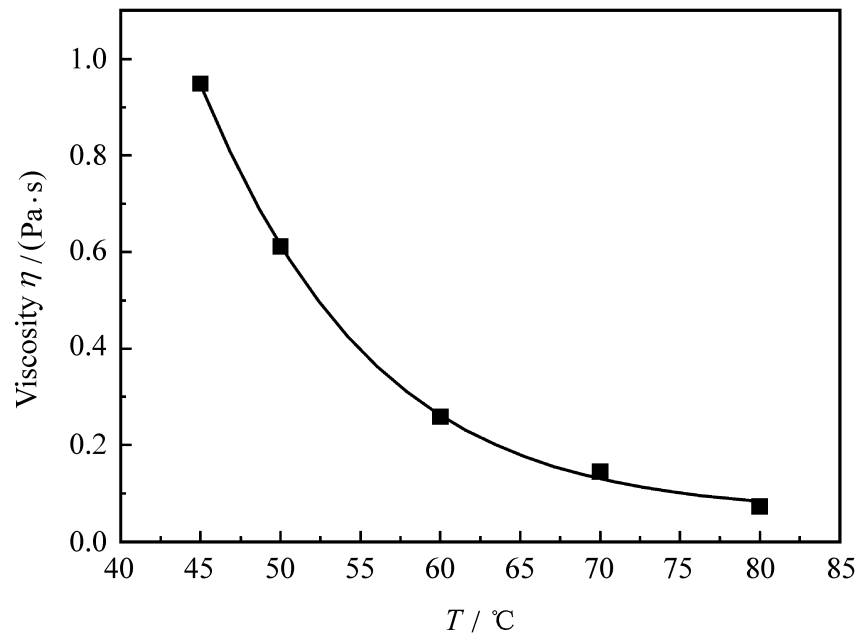


图2　纯618 树脂在不同温度下的粘度

Fig. 2　Viscosity of pure resin 618 at different temperatures

在各实验温度下对体积分数约为50 % 的单向碳纤维织物和玻璃纤维织物分别进行实验，结果如图3 所示。从图3 中可以看出，随着温度的升高，树脂的浸渗速率增大，浸渗过程达到平衡所需的时间也就越短。图4 给出了几个不同时刻下的浸润质量值随温度的变化规律。随着树脂温度的升高，粘度逐渐下降，在纤维分布形式相同的情况下，由于粘滞阻力的显著下降，在几个不同时刻下所获得的浸渗质量值都呈现出规律性的增加。

### 2.2　纤维体积分数的影响

目前描述流体在纤维织物中的渗流规律多借鉴于达西定律。将流动速率与流体所受的压力降联系起来，其中有两个重要的参数：纤维织物集合体的等效毛细压力 $P_c$ 和渗透率 K。毛细压力的理论值通常被建议由 Young-Laplace 方程来估计。其中渗透率的值则一般通过Carman-Kozeny[6] 方程来计

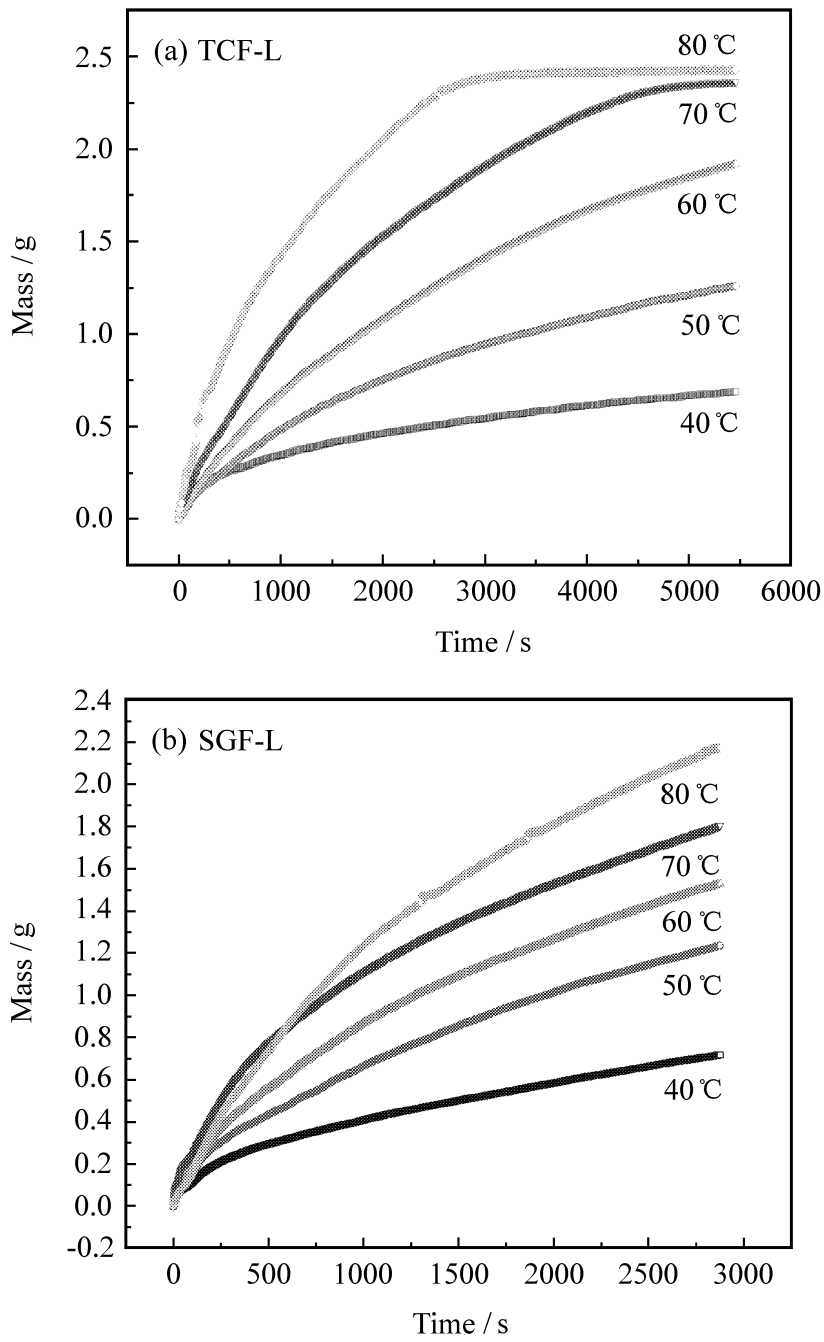


图3　不同温度下的树脂浸渗曲线

Fig. 3　Curves of resin impregnation at different temperatures

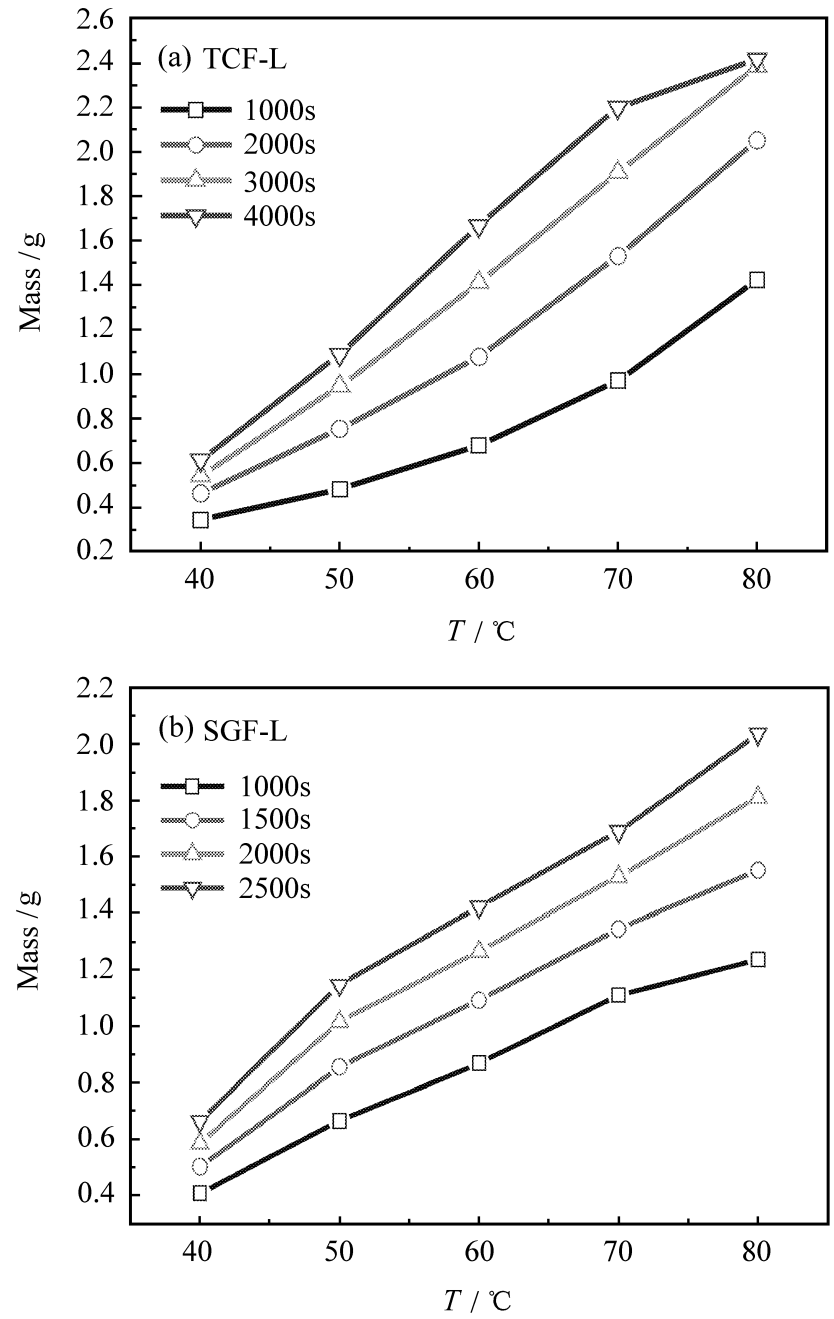


图4　温度对单向织物浸渗速率的影响

Fig. 4　Impregnation mass of different times vs the impregnation temperature

算。

$$K = \frac{D_f^2}{16k_0}\frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \qquad (1)$$

式中：$V_f$ 是纤维体积分数；$D_f$ 是单丝直径；$k_0$ 是 Kozeny 常数。

当其它条件固定，纤维体积分数增大时，纤维堆积体的渗透率将减小，从而流体在纤维织物集合体中的浸渗速率也将会减小。为此，研究了不同铺层形式下的纤维织物随体积分数的变化，浸渗规律发生的变化。此时，用浸渗质量值进行比较已意义不大，将实验测得的质量值转换成浸渗高度：

$$h = \frac{m}{\rho S(1 - V_f)} \qquad (2)$$

式中：m、$\rho$、S、$V_f$ 分别表示实验测得的浸渗质量值、浸润液体的密度、纤维织物的面积和纤维的体积分数。

计算得到的浸渗高度曲线如图5 所示。从图5 中可以看出，同一时刻下的流体浸润高度随着体积分数的增大都呈现出增长的趋势，平行铺层和正交铺层都是如此。

## 2.3　织物铺层方式的影响

在上述关于毛细压力和渗透率的理论计算公式中，都没有考虑等效孔隙结构对流体渗流的影响，似乎只要纤维孔隙率相同，流体在其中的渗流规律也应该相同。这也一直是长期以来被认为不合理的地方。人们认为，不同的孔隙结构将导致不同的等效毛细管形状，流体在其中的流动路径和流体受到的驱动力都将发生较大的改变，相应地流体在其中的渗流规律也会发生改变。为此，本文中通过在同一体积分数下改变铺层形式，以期形成不同的等效孔隙结构，来考证树脂在其中的流动规律。实验结

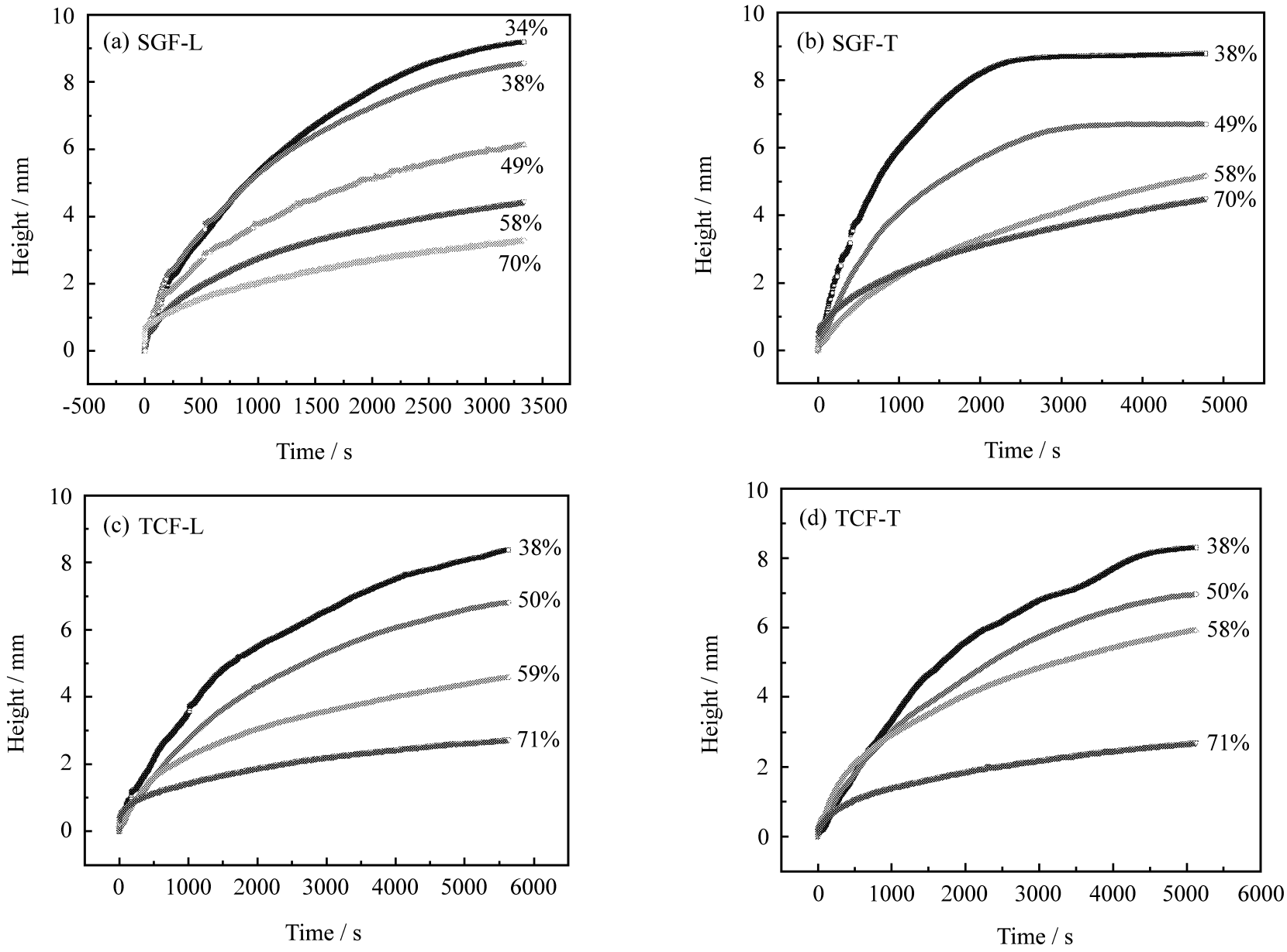


图5　不同体积分数的单向织物的浸渗规律

Fig. 5　Impregnation curves of the unidirectional cloth under different fiber volume fractions

果见图6。从图6 中的浸渗曲线上看，铺层方式的改变对树脂浸渗的影响非常之小，正交铺层下的浸渗质量值略微大一些，但是浸渗质量增长状况与单向铺层相差无几；而且在纤维体积分数较大的情况下，铺层方式的改变对树脂浸渗几乎不产生任何影响。由于本实验中采用的铺层形式还较少，关于孔隙结构的影响还需要通过更多的铺层形式下的实验来验证。

### 2.4　浸润剂的影响

在纤维的纺织过程中，纤维表面常涂敷有浸润剂。纺织型浸润剂虽然能提高纤维的集束性、浸滑性、成膜性和抗静电性，但也会在某种程度上影响纤维的浸润性能。本文中分别研究了树脂在70 ℃下对去除浸润剂前后的单向织物在体积分数为50 % 下的浸润规律，如图7 所示。从图7 中可以很明显地看出，树脂对去除浸润剂后的纤维织物的浸渗速率相对较快，也就是说去除浸润剂能提高纤维的浸润性能。这从物理角度上来说可能是由于浸润剂中的润滑组分降低了纤维的高比表面粗糙度，从而不利于液体对其的浸润性；从化学角度上说，可能是由于浸润剂中憎油型物质——石蜡降低了纤维织物的浸润性能。

## 3　结　论

实验表明：环氧618 树脂温度的升高，可以提高树脂沿纤维织物厚度方向的浸渗质量。在同一温度下，纤维体积分数的增大将使流体在纤维织物集合体中的浸渗速率降低，这与达西定律保持一致。而织物的铺层形式对流体的浸渗情况影响甚小，尤其是在体积分数较大的情况下，几乎没有影响。去除表面浸润剂后，能够较大地提高环氧618 树脂对其的浸润性能。

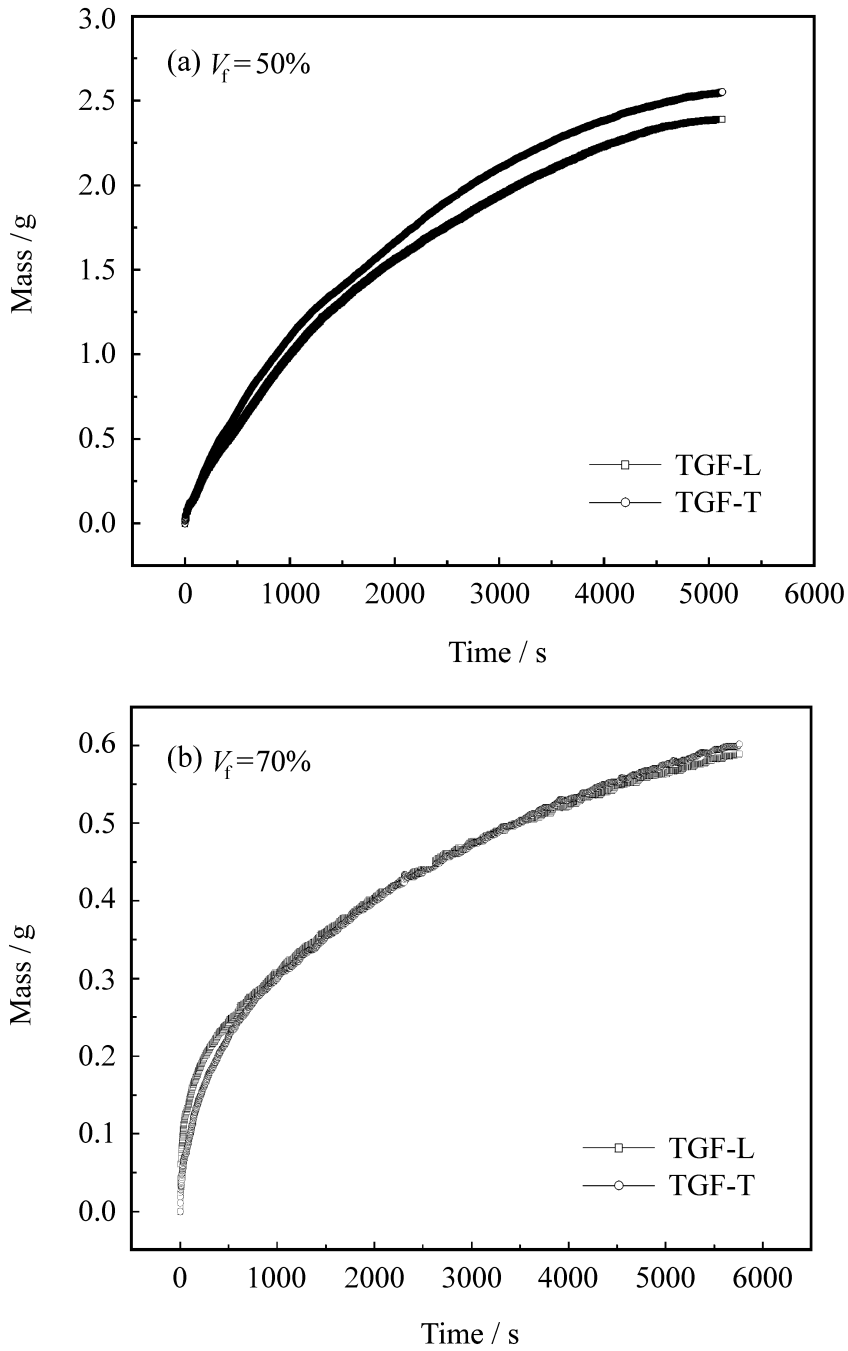


图6 单向T300织物不同铺层形式下浸渗规律的比较

Fig. 6 Comparison of impregnation behavior of different stacking orientations

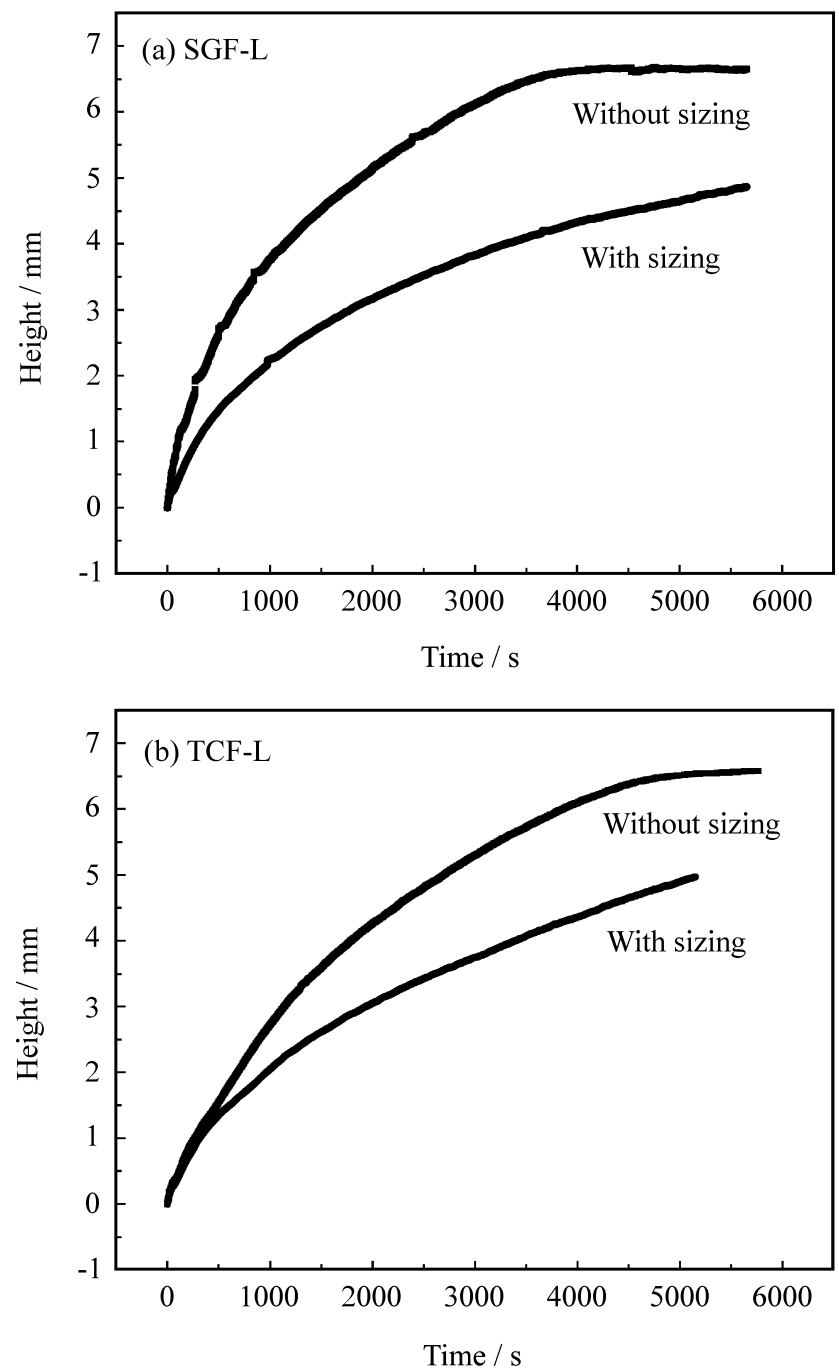


图7 环氧618对单向织物的浸润曲线

Fig. 7 Comparison of impregnation behavior of epoxy resin 618 in unidirectional cloth beds with and without sizing

## 参考文献:

[1] 李 敏，张佐光，孙志杰，等. 单向纤维集束的环氧树脂浸润曲线实验分析[A]. 见：第十三届全国复合材料学术会议论文集[C]. 北京：航空工业出版社，2004. 1070-1074.

[2] Labajos-Broncano L, González-Martín M L, Bruque J M, et al. On the use of Washburn's equation in the analysis of weight-time measurements obtained from imbibition experiments[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1999, 219: 275-281.

[3] Labajos-Broncano L, González-Martín M L, Bruque J M, et al. Influence of the meniscus at the bottom of the solid plate on imbibition experiments[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2001, 234(1): 79-83.

[4] Young Wenbin. Capillary impregnation into cylinder banks[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, 273(2): 576-580.

[5] Labajos-Broncano L, González-Martín M L, Bruque J M. On the evaluation of the surface free energy of porous and powdered solids from imbibition experiments: Equivalence between height-time and weight-time techniques[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2003, 262(1): 171-178.

[6] Pillai Krishna M, Suresh G. Wicking across a fiber-bank[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1996, 183: 100-110.

[7] Batch Gibson L, Chen Yung Tin, Macosko Christopher W. Capillary impregnation of aligned fibrous beds: Experiments and model[J]. Reinforced Plastics and Composites, 1996, 15(10): 1027-1051.

[8] 李 铭，黄 进，戴干策. GMT熔融浸渍中熔体在玻纤毡中的流动[J]. 复合材料学报，2000，17(3): 28-32.
Li Ming, Huang Jin, Dai Gance. Melt flow through glass fiber mat during GMT melt impregnation[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(3): 28-32.

[9] 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.
Chen Ping, Li Hongyun, Chen Xiangbao. Effect of layers on permeability [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2001, 18(1): 30-33.

[10] 路慧玲, 朱永全, 戴干策. PP/GMT 片材骨架材料——玻纤毡[J]. 复合材料学报, 2002, 19(4): 38-41.
Lu Huiling, Zhu Yongquan, Dai Gance. PP/GMT sheets reinforcement: Glass fiber mat [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, 19(4): 38-41.

[11] 陈 鹏, 段跃新, 梁志勇. 预成型体纵向渗透率统计模型[J]. 复合材料学报, 2004, 21(2): 105-110.
Chen Peng, Duan Yuexin, Liang Zhiyong. Research on the statistical model for the longitudinal permeability of preform [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(2): 105-110.

[12] 章亚东, 段跃新, 左 璐. 经编织物法制备连续纤维增强热塑性复合材料的微观形貌和浸润过程分析[J]. 复合材料学报, 2004, 21(6): 63-69.
Zhang Yadong, Duan Yuexin, Zuo Lu. Analysis of microstructure and impregnation process of FRTP composites manufactured from warp-knitting fabric [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(6): 63-69.