

# 软模辅助 RTM 成型舱段构件及其性能研究

Fabrication of the Cabin Component by Flexible-mould

Assisted RTM Process and Its Performance

曾竟成, 尹昌平, 刘 钧

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 长沙 410073)

ZENG Jing-cheng, YIN Chang-ping, LIU Jun

(College of Aerospace and Material Engineering, National

University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**摘要:** 某些复合材料结构件尺寸较大且内部结构复杂, 难以通过传统 RTM 工艺一次整体成型, 并且因其成型压力低而致纤维含量不高, 成型构件力学性能不佳。本研究用硅橡胶来浇铸成型特定形状的软模, 采用软模辅助 RTM 来制备舱段构件这一典型航天结构件。由于硅橡胶软模在复合材料固化成型过程中发挥了设计中的膨胀挤胶作用, 复合材料的纤维体积含量和力学性能得到了显著提高, 舱段整体力学性能满足了航天主承力结构件的使用要求, 因此软模辅助 RTM 在制备具有内部复杂结构的装备结构件上具有广阔的发展前途。

**关键词:** 复合材料; 舱段; RTM; 软模辅助; 硅橡胶; 性能

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006)06-0028-05

**Abstract:** Some equipment components with large size and complicated internal structures were difficult to be manufactured integrally in one time by traditional RTM process. These components fabricated by traditional RTM had poor mechanical properties because the fiber volume fraction was very small. In this paper the complicated flexible-mould was fabricated with silicone rubber. The silicone rubber mould was used to assist RTM to manufacture the cabin component. The surplus resin were squeezed out when the flexible-mould expanded by heating, therefore the fiber volume content of the composites reached 57% and the mechanical performance of the composites improved much. The static mechanical properties of the cabin satisfied the requirements of the primary load bearing structure in aerospace, so the flexible-mould assisted RTM process that was suitable to manufacture the components with complicated inner shape was prosperous in fabricating equipment components.

**Key words:** composite; cabin; RTM; flexible-mould assisted; silicone rubber; property

RTM (Resin Transfer Molding, 树脂传递模塑)是目前液体复合材料成型工艺(Liquid Composite Molding)中发展得比较迅速的一种先进成型工艺<sup>[1]</sup>。RTM 成型的制件具有表面质量优、精度高、空隙率低等优点, 并且工艺设备简单、挥发物少、制造成本较低<sup>[2~4]</sup>, 因而在航空航天、汽车以及民用建筑等各个领域得到广泛的应用<sup>[5]</sup>, 国外复合材料界预计, RTM 技术将成为 20 世纪先进复合材料制造领域的主导成型工艺之一<sup>[6~8]</sup>。

航空航天器使用的树脂基复合材料, 要求有优异的力学性能、稳定和精确的尺寸, 而且部件结构尺寸一般较大、形状较复杂, 在复合材料成型过程中往往需要加热加压固化。传统的工艺采用真空袋热压罐法能够完成大部分任务, 但该方法设备投入大, 工艺

流程占据空间大, 工艺复杂, 因此造价昂贵<sup>[9]</sup>。热膨胀模塑法是 20 世纪 70 年代中期发展起来的复合材料固化成型方法<sup>[10]</sup>, 它是以热膨胀材料为芯模, 刚性材料(金属)为阴模, 加热时, 由于芯模的体积膨胀受到复合材料预成型体及阴模的限制而产生巨大的均匀压力, 从而实现在加热固化过程中对复合材料预成型体施压<sup>[11]</sup>。硅橡胶具有在很宽的温度范围内能长时间保持弹性的特性<sup>[13]</sup>, 因此作为热膨胀芯模材料研究较成熟且应用较广的是有机硅橡胶。采用硅橡胶作为芯模, 国内有关单位制备了雷达天线测量杆<sup>[14, 15]</sup>、贴壁内衬<sup>[16]</sup>和卫星舱的承载架<sup>[9]</sup>; 在国外, Freeman Richard B 等人采用硅橡胶气囊成型了中空结构的复合材料构件<sup>[17]</sup>, Harshberger Jr 等人采用硅橡胶软模成型宇航设备的大表面面积的构件<sup>[18]</sup>。已

有的文献报道都是将硅橡胶制成芯模作为膨胀加压的载体来成型一些简单规则结构的复合材料构件, 还未发现将硅橡胶制成特定形状的软模, 从而用来辅助 RTM 整体成型复杂结构复合材料构件的文献报道<sup>[19]</sup>。本研究所制备的舱段为一典型航天件, 是一内部多筋和凸台、两端带内翻法兰的圆筒状主承力结构件, 传统的 RTM 由于采用刚性模具而导致无法整体成型, 本研究采用硅橡胶软模辅助 RTM 方法, 整体成型了这一碳纤维增强环氧复合材料构件, 并对其性能进行了研究, 探讨了软模辅助 RTM 工艺对于成型构件性能的影响。

## 1 舱段制备及性能考核

### 1.1 主要原材料

碳纤维布, 3K T 300, 面密度  $200\text{g}/\text{m}^2$ , 日本东丽公司; 碳纤维无纬带, 12K T 700,  $300\text{g}/\text{m}^2$ , 日本东丽公司; 碳纤维纱, 12K T 700, 日本东丽公司; 环氧树脂, 双酚 F 型环氧, 环氧值 0.537, 四川亭江科技股份有限公司; 固化剂二乙烯三胺, 化学纯, 中国医药集团上海化学试剂公司; 固化剂二乙氨基丙胺, 化学纯, AG-ROS ORGANICS, USA。

所用软模材料为深圳市固加实业发展有限公司生产的 COCA3+11 加成型硫化有机硅模具胶, 通过设计相关实验测得其在室温至  $180^\circ\text{C}$  温度区间的线膨胀系数为  $2.65 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ , 体积膨胀系数为  $8.26 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ , 在室温至  $80^\circ\text{C}$  范围内体积弹性模量为  $510\text{MPa}$ 。实验测得的硅橡胶热膨胀性能参数可以为软模的设计及成型过程中的工艺控制提供参考, 从而制备出满足要求的复合材料构件。

### 1.2 软模辅助 RTM 工艺原理

软模辅助 RTM 工艺原理如图 1 所示, 与一般 RTM 工艺不同的是在复合材料增强体与刚性芯模间预置了一层受热后能产生适当膨胀力的软质材料(软模)。在本研究中采用深圳市固加实业发展有限公司生产的 COCA3+11 加成型硫化有机硅模具橡胶作为软模材料, 并依据舱段的内部结构浇筑成型了具有特定形状的硅橡胶软模, 舱段的外部结构由阴模来保证, 采用金属芯模作为支撑, 内置加热装置于金属芯模内, 然后和刚性阴模组成组合模具来进行 RTM 注射。当注射过程结束后对模具进行必要的固化加热时, 一方面软模对纤维复合材料提供固化热量的同时又可以通过自身的膨胀对其产生必要的成型压力, 可以提高复合材料的力学性能, 另一方面软模的膨胀可以压缩挤胶, 将多余的尚处于流动状态的胶液挤压排

出从而提高复合材料的纤维含量, 进一步提高复合材料的性能。

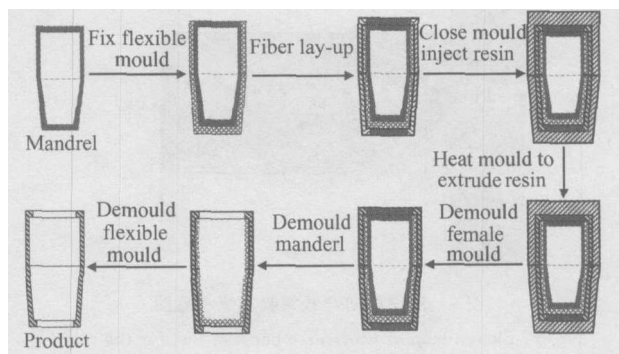


图 1 软模辅助 RTM 工艺原理

Fig. 1 The principle of flexible-mould assisted RTM process

### 1.3 性能考核方法

#### 1.3.1 制品材料性能考核方法

从舱段上取下材料试件, 在 WDW-100 电子万能力学性能实验机上按 GB/T 1447-1983, GB/T 1449-1983 分别测试复合材料的拉伸强度和弯曲强度, 并和采用普通 RTM 工艺和手糊工艺制备的同种复合材料进行比较研究。

#### 1.3.2 舱段结构力学性能考核方法

根据舱段的实际使用要求对舱段进行了整体静载性能测试, 测试方法如图 2 和图 3 所示。

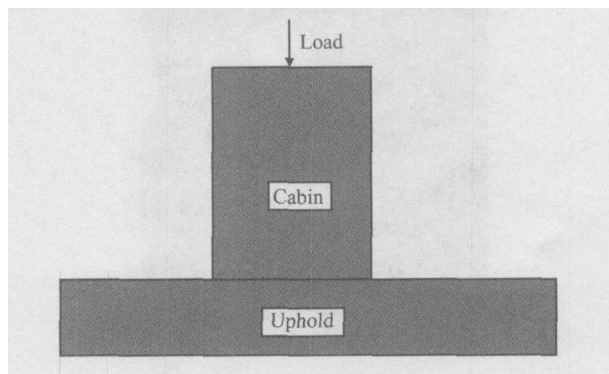


图 2 舱段轴向压载实验方法示意图

Fig. 2 Sketch-map of axial compression test for the cabin

#### 1.3.3 制品纤维体积含量测定及显微结构

纤维体积含量参照国标 GB/T 3366-1996 进行测定, 所用仪器为上海泰明光学仪器有限公司产 HXD-1000TC 金相显微硬度仪, 同时拍照以对制品的显微结构进行分析。

## 2 结果分析与讨论

图 4 为软模辅助 RTM 成型工艺制备出的复合材料舱段制品局部图。由图 4 可以看出, 舱段制品整体

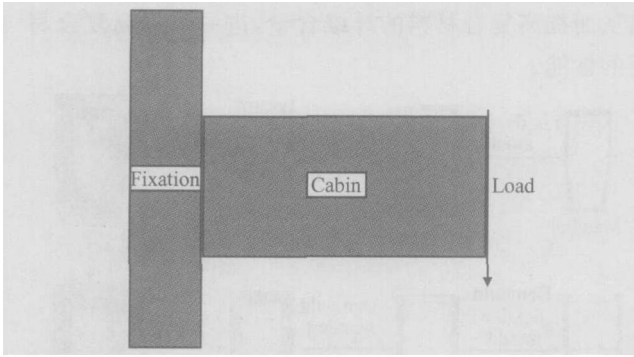


图 3 舱段横向弯载实验方法示意图

Fig. 3 Sketch-map of transverse bending test for the cabin

成型性好,实测其各部分结构尺寸,基本满足设计要求。由于采用硅橡胶软模,可以整体成型内部结构的复合材料构件,这对于复合材料构件的使用性能和力学性能是大有裨益的。普通 RTM 一般都是采用刚性模具,因此无法整体成型此类构件,有关研究用传统 RTM 工艺成型其筒身段,用其它方法制备法兰和加强筋,再通过粘接将其组合成整体,这种成型工艺的缺陷在于:一是纤维含量和成型压力偏低,二是构件不具备整体性的优势。采用硅橡胶软模,解决了具有内部复杂结构的复合材料构件的整体成型问题,这在实践检验中得到了证明。

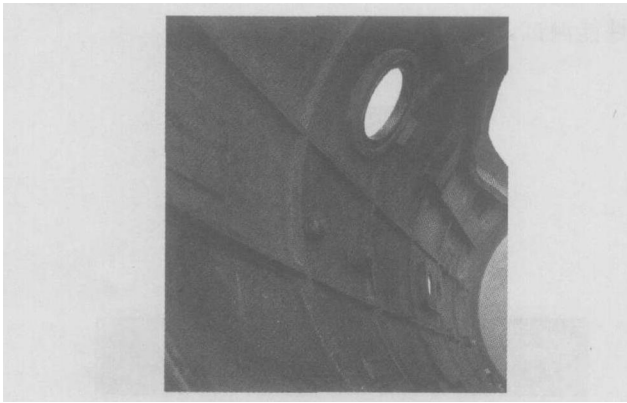


图 4 舱段局部图

Fig. 4 The partial cabin photograph

2.1 制品材料性能

从采用软模辅助 RTM 工艺制备的舱段取下材料试件和采用传统 RTM 工艺以及手糊工艺制备的同种复合材料试件进行性能对比实验,结果如表 1 所示。

从表 1 中数据可以看出,采用软模辅助 RTM 工艺制备构件纤维含量较高,达到了 57%,远远超过了普通 RTM 工艺的 39%。由此反映在材料力学性能上软模辅助 RTM 工艺制备构件肯定要优于普通 RTM 工艺制备构件,数据表明,软模辅助 RTM 工艺制备复合材料其拉伸强度和弯曲强度分别比用普通

RTM 工艺制备的同种复合材料的相应性能高 45% 和 42%。

表 1 三种工艺制备复合材性能比较

Table 1 The properties of composite materials fabricated by three process

Fabrication process	Fiber volume fraction/ %	Tensile strength/ M Pa	Flex ual strength/ M Pa
Flexible-mould assisted RTM	~ 57	669	713
Traditional RTM	~ 39	461	501
H and lay-up	~ 35	428	459

2.2 制品显微结构

三种工艺(硅橡胶软模辅助 RTM、普通 RTM、手糊)制备的复合材料其显微结构如图 5、图 6 和图 7 所示。由图可明显看出硅橡胶软模辅助 RTM 工艺制备的复合材料密实均匀,只能见到两个方向的纤维,普通 RTM 工艺制备的复合材料虽然也比较密实,但材料中有富胶层存在,而手糊工艺制备的复合材料除了有明显富胶层存在外,还有大量气泡存在。表 1 中的力学性能数据也明显说明硅橡胶软模辅助 RTM 工艺制备的复合材料性能优越。

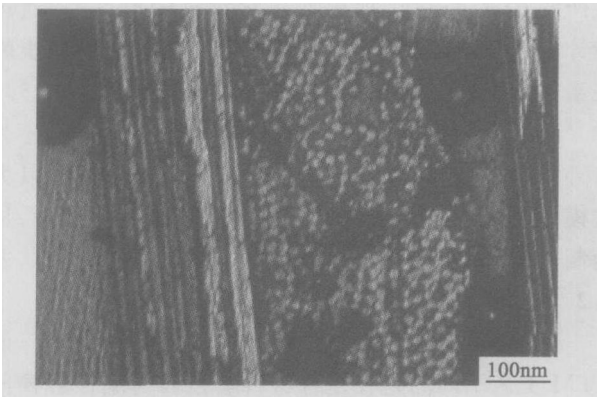


图 5 手糊工艺制备的碳纤维复合材料显微结构

Fig. 5 Microstructure of CFRP fabricated by hand lay-up process

2.3 舱段结构力学性能

对采用普通 RTM 工艺和软模辅助 RTM 工艺成型的复合材料舱段分别进行性能考核,结果如表 2 所示。由于舱段为具有复杂结构的封闭圆筒结构,已有有关研究单位采用 RTM 分部成型,即用传统 RTM 工艺成型其筒身段,用其它方法制备法兰、凸台和加强筋,再通过粘接将其组合成整体,但是对采用这样的方法制备的舱段进行考核表明,舱段整体力学性能一直达不到要求。对本研究所采用软模辅助 RTM 制

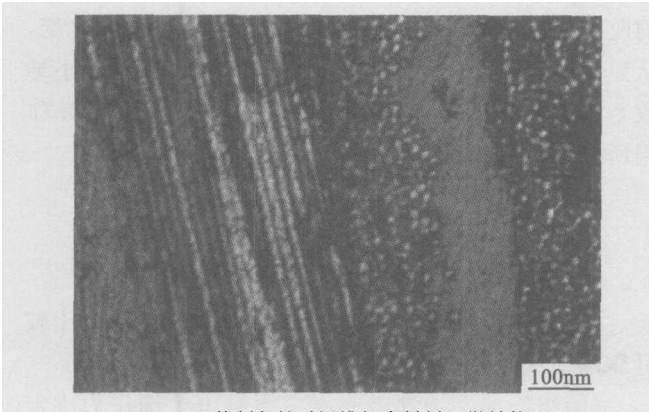


图 6 RTM 工艺制备的碳纤维复合材料显微结构

Fig. 6 Microstructure of CFRP fabricated by RTM process

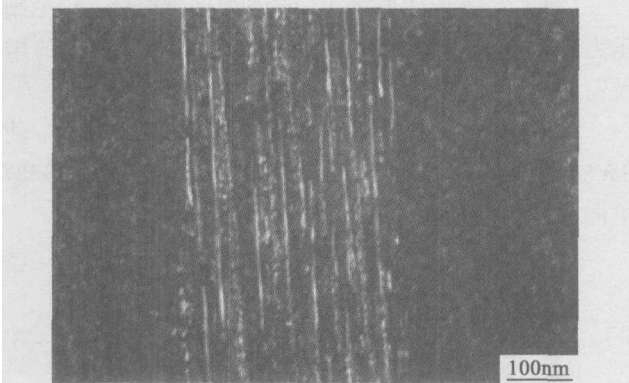


图 7 软模辅助 RTM 工艺制备的碳纤维复合材料显微结构

Fig. 7 Microstructure of CFRP fabricated by flexible-mould assisted RTM process

备的舱段的整体力学性能进行考核表明, 舱段轴向压缩承载性能达到设计指标, 横向弯曲承载性能更是达到了设计指标的 127%。这显然得益于软模辅助 RTM 工艺整体成型的优势, 而且硅橡胶软模在成型中发挥了设计中的膨胀挤胶作用, 从而使最终成型舱段构件显示出极其优异的性能, 由此可以看出, 软模辅助 RTM 工艺在制备具有内部复杂结构的复合材料结构件上具有广阔的发展前景。

表 2 两种工艺制备的舱段结构承载能力比较

Table 2 Load-bearing comparison of the cabin components fabricated by two different processes

Fabrication process	Axial compression	Transverse bend
	loading capability	loading capability
Fabrication step by step using traditional RTM	Can't reach target	Can't reach target
Fabrication integrally using flexible-mould assisted RTM	Reach target	27% more than target

3 结论

(1) 软模辅助 RTM 工艺可以一次性整体制备出

大型复杂结构的复合材料构件, 制品外形完整、尺寸准确。

(2) 软模辅助 RTM 工艺制备的复合材料构件纤维含量高(达到 57%), 拉伸强度和弯曲强度分别比用 RTM 工艺制备的同种复合材料的相应性能高 45% 和 42%。

(3) 材料显微照片表明用软模辅助 RTM 工艺制备的复合材料密实均匀, 没有明显富胶层, 而其它两种工艺制备的复合材料有明显富胶层, 手糊工艺制备的复合材料还能看到大量气泡。

(4) 舱段结构承载实验结果表明用 RTM 工艺分步成型的舱段不能通过考核, 而用软模辅助 RTM 工艺整体制备的舱段性能优越, 通过了考核, 因此软模辅助 RTM 工艺是一种具有广阔发展前景的大型复杂复合材料构件制备工艺。

参考文献

[1] 沃西源. RTM 成型工艺技术进展[J]. 航天返回与遥感, 2000, 21 (1): 48- 52.

[2] 石定杜, 甘长茂. RTM 制造技术的新进展[J]. 玻璃钢/ 复合材料, 1994, (6): 42- 45.

[3] SCOTT W B, CRAIG R H. Resin Transfer Molding: A decade of technology advance[J]. Sampe Journal, 1998, (6): 3- 23.

[4] KERDALL K. Characterization of the RTM process[J]. Composite manufacturing, 1992, 3(4): 235- 277.

[5] 梁志勇, 段跃新, 林云等. 乙烯基酯树脂体系流变特性及 RTM 工艺窗口预报研究[J]. 材料工程, 2001, (8): 36- 39.

[6] 仲伟虹, 梁志勇, 张佐光, 等. RTM 工艺及其在我国航空工业的应用前景[J]. 材料工程, 1995, (1): 9- 11.

[7] 段华军, 马会茹, 王钧. RTM 工艺国内外研究现状[J]. 玻璃钢/ 复合材料, 2000, (5): 46- 48.

[8] RUDD C D, LONG A C, KENDALL K N, et al. Liquid molding technologies[M]. London: Woodhead Publishing Ltd, 1997.

[9] 孙巍. 复合材料成型模具用硅橡胶性能测试及其改性[D]. 长沙: 国防科技大学硕士学位论文, 1997.

[10] 苑玲, 甄华生. 软模热膨胀法成型发动机燃烧室壳体贴壁内衬[J]. 宇航材料工艺, 1993, 23(2): 38- 41.

[11] 肖少伯. 复合材料成型新工艺 热胀成型法[J]. 宇航材料工艺, 1996, (6): 10- 13.

[12] 钱玉林. 复合材料热膨胀模型开模法成型工艺研究[A]. 第三届全国复合材料学术会议论文集[C]. 北京: 世界图书出版社, 1983.

[13] H B 加尔莫诺夫编, 秦怀德等译. 合成橡胶(第二版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988.

[14] 鞠金山. 碳/ 环氧复合材料在雷达天线测量杆上的应用研究[J]. 电讯技术, 1998, 38(2): 45- 48.

[15] 鞠金山. 轻质复合材料软模成形工艺技术及其应用[J]. 现代电子, 1997, (4): 62- 66.

[16] 苑玲, 甄华生. 软模热膨胀法成型发动机燃烧室壳体贴壁内衬[J]. 宇航材料工艺, 1993, 23(2): 38- 41.

[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)

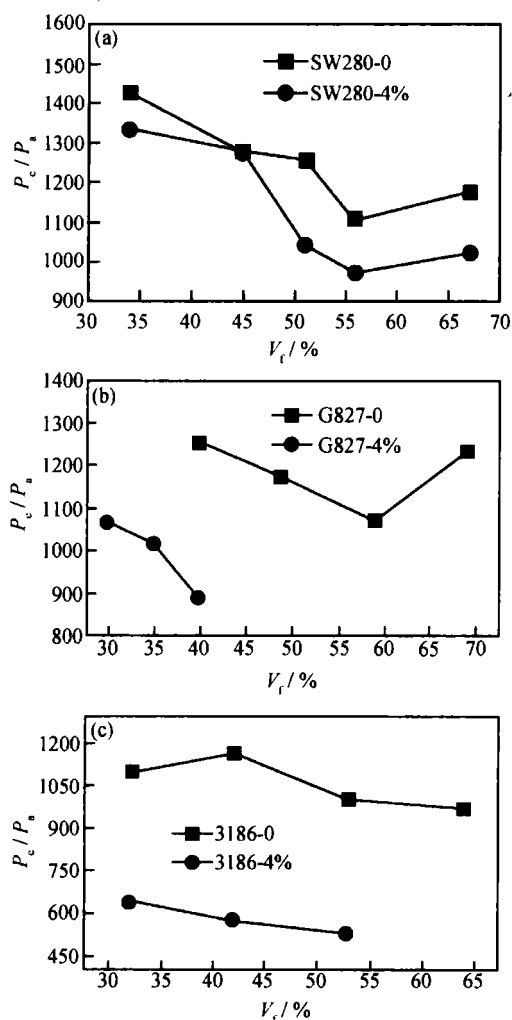


图 6 三种织物不同定型剂含量不同  $V_{fc}$  时的毛细压力 (a) SW280; (b) G827; (c) 3186

Fig. 6 Capillary pressure of three kinds of fabrics with different  $V_{fc}$  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  $V_{fc}$  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  $V_{fc}$  的增大而减小而在  $V_{fc}$  之后则随  $V_{fc}$  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)。