

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.12.011

工艺参数对 VARTM 中树脂充模流动的影响研究^{*}

赖家美,王德盼,陈显明,王科,何建涛

(南昌大学机电工程学院聚合物成型研究室,南昌 330031)

摘要:采用可视化树脂流动实验装置,研究了高渗透导流介质、树脂黏度、树脂注射方式和真空压力等工艺参数对真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺中树脂充模流动过程的影响。结果表明,VARTM工艺中高渗透导流介质对树脂充模的速度起着主导作用;随着树脂黏度的增大,完成充模所需时间呈现指数增加趋势;树脂注射方式对充模速度和充模流动模式影响大,树脂采用边界点型注射时充模所需时间是边界线型注射的3倍,是四周注射的9倍;随着真空压力的增大,完成充模所需的时间呈现先变大后变小的趋势。

关键词:真空辅助树脂传递模塑;高渗透导流介质;树脂黏度;注射方式;真空压力;充模流动

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2013)12-0049-05

Effects of Technological Parameters on Resin Molding Flow Process in Vacuum Assisted Resin Transfer Molding

Lai Jiamei, Wang Depan, Chen Xianming, Wang Ke, He Jiantao

(Polymer Processing Research Lab, College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract : With visual resin flow experiment, the effects of the process parameters such as high permeability medium, resin viscosity, the injection way of resin and vacuum pressure, on resin molding process in vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) were studied. The results show that the high permeability medium play a dominant role in the speed of resin filling in VARTM process ; the filling time increases with the increase of resin viscosity ; resin filling speed and resin flow pattern are greatly affected by the injection way of resin, when the filling time of resin point type is three times for line injection and nine times for surrounded injection ; the filling time increases firstly and then decreases with the vacuum pressure gradually increases.

Keywords : vacuum assisted resin transfer molding ; high permeability medium ; resin viscosity ; injection mode ; vacuum pressure ; die filling flow

随着复合材料工业的快速发展,在树脂传递模塑(RTM)成型技术基础上发展起来的一种先进复合材料低成本液体模塑成型新工艺——真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺,被认为是一种环保友好型,制作大尺寸、复杂结构,能够一次性成型带有加强筋、夹芯、预埋件的大型构件的理想工艺。近年来该工艺已在航空航天、汽车船舶、建筑桥体和风机叶片等领域大型复合材料构件的整体制备方面得到比较深入的研究和广泛应用^[1-2]。图1为VARTM工艺原理示意图。VARTM工艺是在单面刚性模具上以真空袋膜包覆密封纤维增强体及辅助材料,在真空状态下排出模腔中的气体,利用真空负压驱动树脂的流动、渗透实现对纤维及其织物的浸润,在室温或加热条件下固化成型出一定形状和纤维体积分量的制品^[3]。

VARTM的成型过程可分为树脂的充模流动和

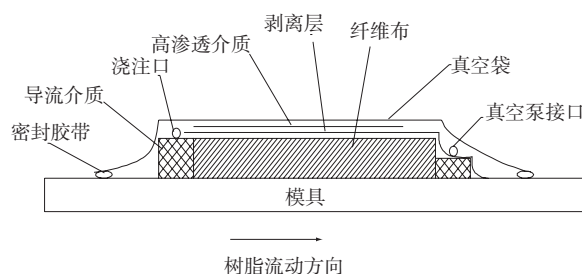


图1 VARTM工艺原理示意图

固化反应两步。充模流动作为工艺过程的第一步,确保树脂充分浸润增强体是保证制品质量的关键,由于涉及的工艺参数很多,因此也是工艺控制的难

^{*} 国家自然科学基金项目(51263015)、江西省自然科学基金项目(20122BAB206011)

联系人:赖家美,博士,副教授,硕士生导师,主要从事聚合物基复合材料的研究与应用

收稿日期:2013-09-12

点^[4-5]。为准确预测树脂充模流动前沿位置,合理设置工艺参数,应充分了解 VARTM 工艺中树脂的充模流动过程及流动规律。笔者研究了高渗透导流介质、树脂黏度、注射方式和真空压力等工艺参数对 VARTM 工艺中树脂充模流动过程及规律的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

双向向 0°/90° 玻璃纤维布: LT600, 面密度 640 g/m², 浙江成如旦新能源科技有限公司;
真空袋: 400Y, 上海沥高科技;有限公司;
密封胶带: LG150, 上海沥高科技;有限公司;
高渗透导流介质: VI160, 上海沥高科技;有限公司。

由于本实验主要研究工艺参数对树脂充模流动的影响, 不涉及固化, 因此用玉米糖浆代替树脂进行实验研究, 这样更加环保且节约材料。

1.2 主要仪器及设备

真空泵: X-25 型, 德国普旭股份有限公司;
树脂收集器: SJQ-10 型, 厦门维曼材料科技有限公司;
模具: 钢化玻璃板, 尺寸 120 cm×80 cm, 市售;
数码高清摄像机: HDR-XR200 型, 日本索尼公司;
真空调压阀: IRV20 型, 日本 SMC 公司;
旋转式黏度计: NDJ-1 型, 上海群昶科学仪器有限公司。

2 结果与讨论

2.1 高渗透导流介质对树脂充模流动过程的影响

VARTM 工艺中利用真空负压来吸注树脂浸润纤维增强体, 吸注压力最大为 0.1 MPa, 属低压成型。通常纤维增强体的渗透性很差, 导致树脂难以顺利在增强体中流动浸润, 为了使树脂充填速度满足成型工艺要求, 常在增强体表面铺放导流介质来辅助树脂在增强体表面流动。

高渗透导流介质的渗透率通常比纤维增强体大 2~3 个数量级, 树脂同时在两种渗透率差别很大的多孔介质中流动, 流动速率存在较大差异, 使得 VARTM 工艺的树脂充填行为较传统 RTM 工艺(无导流介质辅助)更为复杂^[6-7]。通常纤维增强体表面不铺放导流介质时, 树脂在增强体中充模流动过程如图 2 所示; 在纤维增强体表面铺放导流介质时, 树脂在增强体中充模流动过程如图 3 所示。

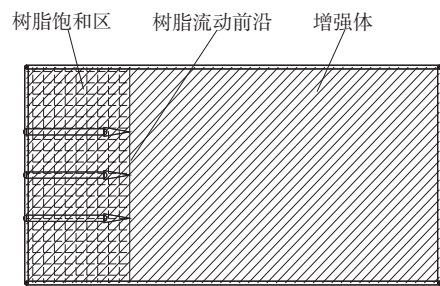


图2 无导流介质树脂充模流动示意图

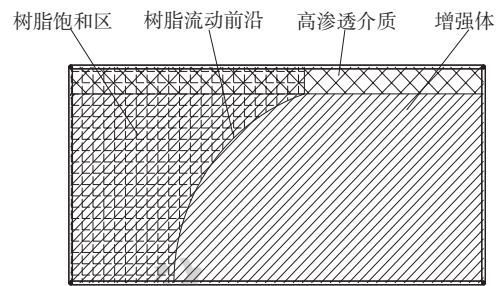


图3 有导流介质树脂充模流动示意图

为研究高渗透导流介质对 VARTM 工艺中树脂充模流动的影响, 进行了两组总计 8 个实验, 方案设计和实验结果见表 1。

表1 高渗透导流介质对 VARTM 工艺中树脂充模流动过程的影响

组别	纤维增强体层		高渗透介质层		充模时间/s	
	尺寸/(mm×mm)	层数	尺寸/(mm×mm)	位置	完成表层充模	完成底层充模
I	600×300	5			664	665
	600×300	5	300×300	靠近注胶口	392	410
	600×300	5	300×300	靠近抽气口	638	659
	600×300	5	600×300	全覆盖	238	252
II	300×300	5			167	169
	300×300	5	300×300	顶面	64	68
	300×300	5	300×300	中间	68	69
	300×300	5	300×300	底面	49	44

分析表 1 第 I 组实验结果可知, 在导流介质全覆盖纤维增强体的情况下树脂充模流动速度最快, 与没有铺放导流介质的情况相比, 充模速度提高了近 2 倍。树脂在纤维增强体表层和底层充模流动前沿位置与对应的时刻如图 4 所示。在使用同样尺寸的导流介质只是铺放位置不同的情况下, 铺放在注胶口端较铺放在抽气口端完成整个充模所需的时间要少 249 s。这是因为导流介质铺放在靠近注胶口端对树脂的充模流动从注胶初始阶段就起到很好的导流作用, 而导流介质铺放在抽气口端则与注胶口端隔断, 对树脂的整个充模流动过程几乎不起导流作用, 因此充模所需的时间与完全没有导流介质的情况下树脂完成充模所需时间相差不大。这在实际生产中应予以注意。

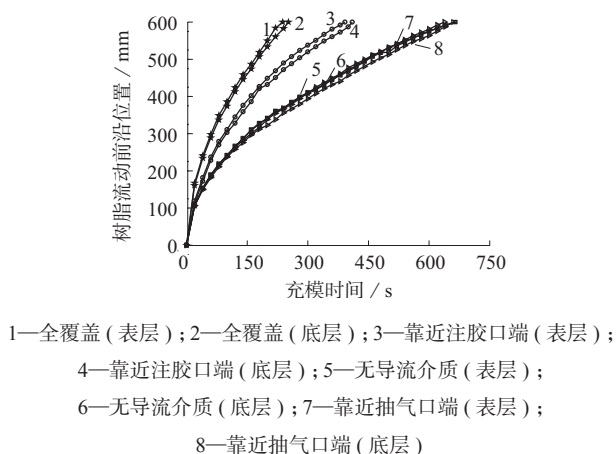


图4 导流介质使用比例和铺放位置对树脂充模过程的影响

表1第Ⅱ组中导流介质在纤维增强体顶面、中间和底面三种铺放方式下树脂在纤维增强体表层和底层流动前沿位置与时刻的关系如图5所示。分析可知,与不铺放导流介质相比,无论导流介质铺放在纤维增强体哪个位置都可起到加快树脂充模流动的作用,充模速度提高近1.5倍,且导流介质铺放在增强体底面时树脂充模速度快于铺放在顶面和中间层的情况。这是由树脂在纤维增强体内部的流动规律决定的。树脂注入纤维增强体后,在整个纤维增强体中是不断流动的,未被浸润的纤维增强体所得到的树脂来源于两个部分,一部分来自注入口,另一部分来自于纤维增强体的已被浸润部分。而树脂从上向下渗透比从下向上渗透要容易得多。这就造成顶面和底面的差异,在顶面流动的树脂不断向下面渗漏;而导流介质铺放在底面,一方面促进树脂在底面的流动,另一方面得到位于自身上面的铺层的已浸润部分向下流动的树脂,因此导流效果与前两种情况相比较就显得更好。

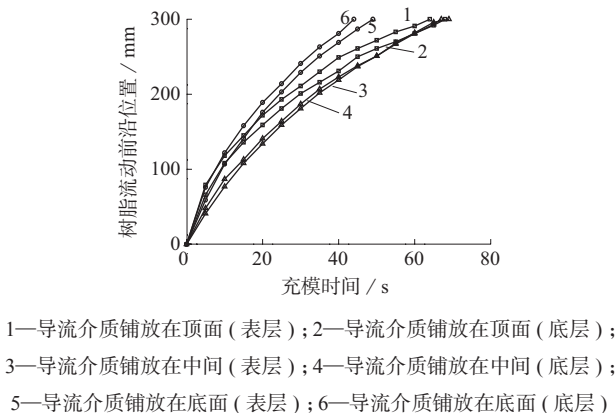


图5 导流介质不同铺放位置对树脂充模流动的影响

导流介质在三种铺放方式下树脂充模过程中在增强体表层和底层相同时刻树脂流动前沿差距值

如图6所示,其中负值表示底层流动速度大于表层。由图6可知,导流介质铺放在增强体顶面和底面时,流动前沿位置差距值大于铺放在中间时的差距值。这说明增强体中间区域有导流介质时,能促进树脂在充填增强体的过程中保持表层和底层前沿一致性,这样可以提高制品的质量,减少干斑和空隙的形成。因此实际生产中可在纤维增强体中间加入一定量的玻璃毡等具有较好渗透性的材料来提高充模的均匀性,或是在增强体底面铺放部分导流介质减小表层和底层的流动前沿差距使充填趋于一致,进而得到综合性能优良的制品。

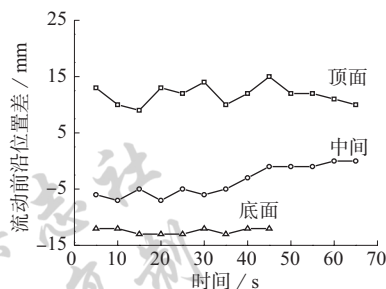


图6 导流介质不同铺放位置时表层与底层树脂流动前沿位置差

2.2 树脂黏度对树脂充模流动过程的影响

树脂的黏度是 VARTM 工艺中一个重要的参数,工艺要求体系黏度在一定范围之内(100~800 mPa·s)^[8-9]。黏度过高会导致树脂充模流动困难,充模时间长且难以浸润纤维增强体;黏度过低会导致树脂充模流动不稳定,制品中容易形成干斑和孔隙等缺陷^[10]。为研究树脂黏度对 VARTM 工艺中树脂充模流动过程的影响,进行了5次实验,方案见表2。

表2 树脂黏度对 VARTM 工艺中树脂充模流动的影响

树脂黏度 / (mPa·s)	纤维增强体		充模时间 /s	
	尺寸/(mm×mm)	层数	完成表层充模	完成底层充模
100	300×300	5	30	32
250	300×300	5	64	68
400	300×300	5	106	117
550	300×300	5	207	220
700	300×300	5	268	282

实验测得5种黏度条件下树脂充模流动过程曲线如图7所示,分析可知随着树脂黏度的增大,树脂浸润纤维增强体过程中表层与底层的前沿位置差距值先变大后变小最后趋于稳定值。这是由于树脂在低黏度时有良好的流动性,容易浸润纤维增强体;随着黏度的逐渐增大树脂流动性变差,浸润一致性变差,增强体表层与底层的树脂流动前沿位置差距拉大,但随着树脂黏度进一步增大,树脂在增强体中

流动浸润变得非常缓慢,由于渗漏作用,促使表层树脂有充分的时间对厚度方向的增强体进行浸润,使得整个充模流动过程保持较好的均匀性和稳定性,因此完成表层与底层充模所需的时间间隔差增速也逐渐放缓,图 8 为树脂黏度与完成充模(表层与底层)时间差的关系曲线。

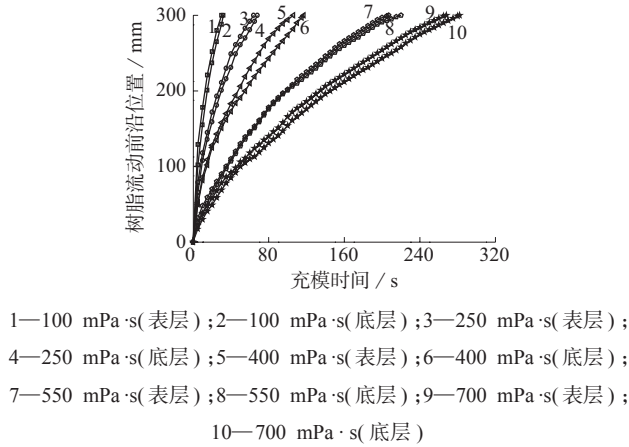


图 7 不同树脂黏度条件下充模流动过程曲线

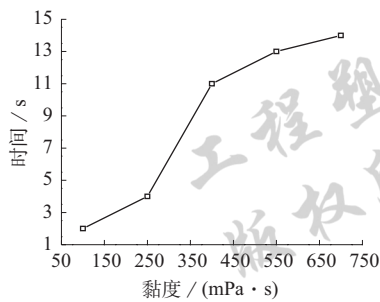


图 8 树脂黏度与完成充模(表层与底层)时间差的关系

实验结果还表明,随着树脂的黏度增大完成充模所需的时间变长,并呈现出近似指数关系,见图 9。这说明树脂黏度对充模完成时间影响很大。

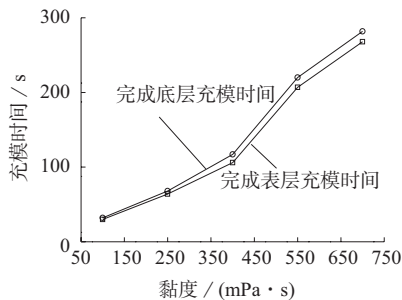


图 9 树脂黏度与充模完成时间的关系

2.3 注射方式对树脂充模流动过程的影响

树脂的注射方式对树脂的充模流动模式起着决定性作用,从而对充模流动速度有着很大的影响。在 VARTM 工艺中树脂的不同注射方式及其相应的充模流动过程很复杂(见表 3),通过这些流动模式

可以预测充模流动的总趋势。

表 3 树脂注射方式及其流动模式和充模时间

注射方式	流动模式	充模流动时间 / s
边界点型注射	扇形流动	229
边界线型注射	单向流动	68
中间点型注射	径向流动	65
四周线型注射	混合流动	22

四种注射方式下的实验过程如图 10 所示。实验中纤维增强体尺寸为 300 mm×300 mm,树脂黏度为 250 mPa·s,真空压力为 -0.1 MPa。

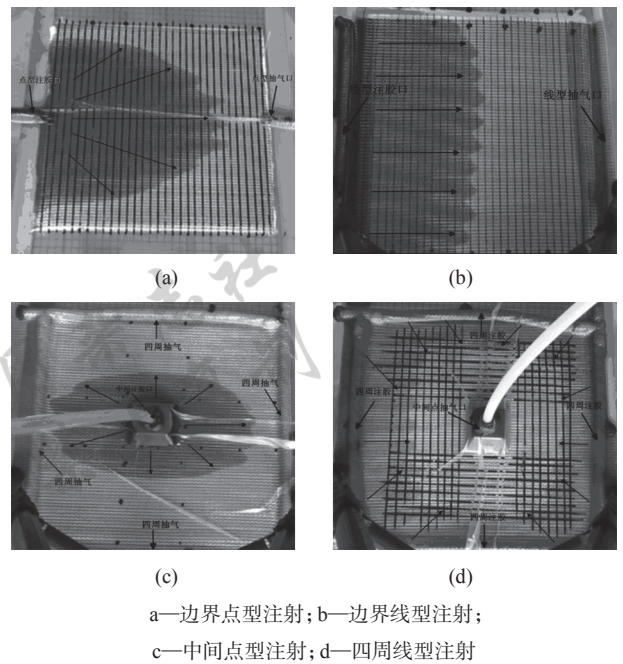


图 10 注射方式实验图

由表 3 及图 10 可知,相同的充模面积边界点型注射所需的时间是边界线型注射的 3.4 倍,这是由于线型注射的注射口周长数倍于点型注射口的周长,充模过程中可提供的树脂瞬时体积流量大,因此充模所需时间短。中间点型注射充模所需时间与边界线型注射充模所需时间基本相同,这是由于边界线型注射时纤维增强体另外一边是线型抽气口,而中间点型注射时纤维增强体四周均为抽气口,此时模腔内真空度较单边抽气要好,所以虽为点型注射但其速度并不慢。四周注射中间抽气时树脂充模最快,仅需 22 s 就可完成,是边界线型注射和中间点型注射所需时间的 1/3,是边界点型注射所需时间的 1/9,这是由于四周注射的外围周长形成一个整体很大的注射口,在模腔内真空负压相差不大的情况下,任意时刻其注入树脂的体积流量都是数倍于点型注射和边界线型注射的情况,在树脂充填相同区域的纤维增强体时充模所需时间成倍地缩短。

因此,工业生产中为了得到良好的提速效果,提高生产效率,应适当增加注射口和抽气口数量,特别是在制备大面积复杂制品时应同时采用多点抽气和多点注射的方式来提高树脂的充模流动速度,减少充模的时间。

2.4 真空压力对树脂充模流动过程的影响

在 VARTM 工艺中,真空度是一个重要的工艺控制参数,通过在真空泵与树脂收集器之间安装真空调压阀来调节真空度。在其它条件不变的情况下,真空压力对树脂充模流动过程的影响见表 4。

表 4 真空压力对充模时间的影响

真空压力 / MPa	增强体尺寸 / (mm × mm)	层数	树脂黏度 / (mPa · s)	充模时间 / s
-0.06	300 × 300	5	275	90
-0.07	300 × 300	5	275	92
-0.08	300 × 300	5	275	95
-0.09	300 × 300	5	275	91
-0.098	300 × 300	5	275	88

由表 4 可看出,真空压力对充模流动所需时间的总体影响不大,在真空压力为 -0.08 MPa 时完成充模所需时间最长,为 95 s,在真空压力为 -0.098 MPa 时所需时间最短,为 88 s,相差仅仅 7 s。进一步分析可知,真空压力从 -0.06 MPa 增加到 -0.08 MPa 时,完成充模所需时间逐渐变长,这是由于随着真空度增加纤维增强体体积分数变大,导致树脂在纤维增强体中的流动浸润变得困难,所以完成充模流动所需时间变长;真空压力从 -0.08 MPa 增加到 -0.098 MPa 时,完成充模所需时间变短,这是由于此时真空度能够为树脂充模流动所提供的驱动力大于增强体体积分数的变化,因此完成充模所需时间逐渐变小。

3 结论

(1) 高渗透导流介质部分覆盖在纤维增强体表面时,铺放在靠近注胶口端导流作用明显,而铺放在靠近抽气口端则导流效果大大减弱,与不铺放的情况相差不大;全覆盖时不管是铺放在纤维增强体顶面、中间还是底面,都起到良好的导流作用。

(2) 树脂充模流动所需时间随着树脂黏度的增加而变长,并呈现出指数变长的趋势。

(3) 树脂的注射方式对树脂的充模流动模式和充模速度都有影响,实验测得边界点型注射充模所需时间是边界线型注射的 3 倍,是四周注射的 9 倍。随着制品尺寸的变大,影响会更加显著。

(4) 随着真空压力的增大,树脂完成充模流动所需的时间呈现先变大后变小的趋势。

参考文献

- [1] Brouwer W D, Herpt E C, Labordus M. Vacuum injection moulding for large structural applications[J]. Composites Part A, 2003, 34(6):551-558.
- [2] 吴飞. 真空辅助树脂转移模塑工艺研究进展 [J]. 高科技纤维与应用, 2011(2):39-43.
Wu Fei. Research progress of the vacuum assisted resin transfer molding process [J]. Hi-tech Fiber & Application, 2011(2):39-43.
- [3] Correia N C, Robitaille F, Long A C, et al. Analysis of the vacuum infusion moulding process: I. Analytical formulation [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(12):1 645-1 656.
- [4] Vishwanath R F, Kuang-ting H. Effects of vacuum pressure, inlet pressure, and mold temperature on the void content, volume fraction of polyester / E-glass fiber composites manufactured with VARTM process [J]. Journal of Composite Materials, 2011, 45(26):2 727-2 742.
- [5] 赵立波, 张飞, 张阳, 等. VARTM 用不饱和聚酯树脂的成型工艺研究 [J]. 绝缘材料, 2011(5):21-23, 34.
Zhao Libo, Zhang Fei, Zhang Yang, et al. Molding process of unsaturated polyester resin for vacuum assisted resin transfer molding [J]. Insulating Materials, 2011(5):21-23, 34.
- [6] 杨金水, 肖加余, 曾竟成, 等. 真空导入模塑工艺树脂流动行为研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 2010(1):5-8.
Yang Jinshui, Xiao Jiayu, Zeng Jingcheng, et al. Resin flow behavior of vacuum infusion molding process [J]. Aerospace Materials & Technology, 2010(1):5-8.
- [7] 郑澎, 张彦飞, 赵贵哲, 等. 真空辅助 RTM 工艺中孔隙的形成机理及实时控制研究 [J]. 工程塑料应用, 2010, 38(10):44-47.
Zheng Peng, Zhang Yanfei, Zhao Guizhe, et al. Formation mechanism and real-time process-control of void in Vacuum-Assisted RTM process [J]. Engineering Plastics Application, 2010, 38(10):44-47.
- [8] 孙赛, 刘木金, 王海, 等. RTM 成型工艺及其派生工艺 [J]. 宇航材料工艺, 2010(6):21-23.
Sun Sai, Liu Mujin, Wang Hai, et al. RTM molding process and its derive technology [J]. Aerospace Materials & Technology, 2010(6):21-23.
- [9] 孔晋峰, 张彦飞, 刘亚青. 复合材料 RTM 成型工艺参数的研究 [J]. 工程塑料应用, 2009, 37(4):42-44.
Kong Jinfeng, Zhang Yanfei, Liu Yaqing. Research in composite RTM molding process parameters [J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(4):42-44.
- [10] 魏俊伟, 张用兵, 郭万涛. 真空辅助成型 (VARI) 工艺研究进展 [J]. 材料开发与应用, 2010(3):99-105.
Wei Junwei, Zhang Yongbing, Guo Wantao. Development of vacuum assisted resin infusion (VARI) [J]. Development and Application of Materials, 2010(3):99-105.