

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.05.010

导流介质对 VARTM 复合材料纤维分布及空隙率的影响^{*}

赖家美,陈显明,王德盼,鄢冬冬,王科

(南昌大学机电工程学院聚合物成型研究室,南昌 330031)

摘要:研究了导流介质尺寸对真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺中树脂流动行为的影响,以及对复合材料制品中纤维分布和空隙率的影响。结果表明,随着导流介质尺寸的增加,树脂在增强体中的流动速度加快,并呈现指数加速趋势;制品中纤维体积含量呈现先减少后增大的趋势,并且以导流介质边界为纤维体积含量高低的分界线;复合材料制品的空隙率范围在3.86%~19.92%,空隙率呈现先增大后减小再加速增大的趋势。

关键词:导流介质尺寸;真空辅助树脂传递模塑成型;流动规律;纤维分布;空隙率

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)05-0042-05

Effects of Infusion Media on Fiber Volume Fraction Distribution and Void Content in Vacuum Assisted Resin Transfer Molding

Lai Jiamei, Chen Xianming, Wang Depan, Yan Dongdong, Wang Ke

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

Abstract: Effects of the size of infusion media on resin flow behavior, fiber volume fraction distribution and void content in vacuum assisted resin transfer molding(VARTM) were studied. The results showed that with the increase of infusion media size, the resin flow rate increased exponentially; the fiber volume fraction showed a tendency to increase after the first decrease, and the infusion media boundary was just the high and low fiber volume fraction line; the void content increased first and then decreased and increased tremendously at last, varied from 3.86% to 19.92%.

Keywords: size of infusion media; vacuum assisted resin transfer molding; flow regularity; fiber volume fraction distribution; void content

真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺是一种新型低成本的纤维增强树脂复合材料大型制件的成型技术,它是在真空状态下排出纤维增强体中的气体,通过树脂的流动、渗透,实现对纤维及其织物的浸渍,并在室温下进行固化,最终形成一定树脂/纤维比例的复合材料成型工艺方法^[1]。

图1展示了典型的VARTM装置示意图。由于纤维增强体渗透率很低,为满足工艺要求,通常铺放导流介质来加速树脂的流动,辅助树脂在增强体表面

面的流动浸润。模具表面预先涂抹脱模蜡,以便在制件固化后顺利脱模;然后铺放纤维预成型增强体,增强体表面再铺放一层脱模布,用于顺利将制件与导流介质分离;两端放置树脂管和真空管。整个铺叠用真空袋覆盖并用密封胶带封住四围,最后用真空泵抽真空,在真空负压的作用下树脂开始流动并浸润纤维增强体。

在用VARTM工艺制备复合材料的过程中,树脂在纤维增强体中的流动行为是影响制品质量的关键因素^[2-3];纤维体积含量是衡量复合材料性能优劣的一个重要指标,其含量过低不能有效体现出纤维对复合材料的增强作用,含量过高又会导致树脂不能在纤维层间形成足够厚的界面过渡层,使树脂

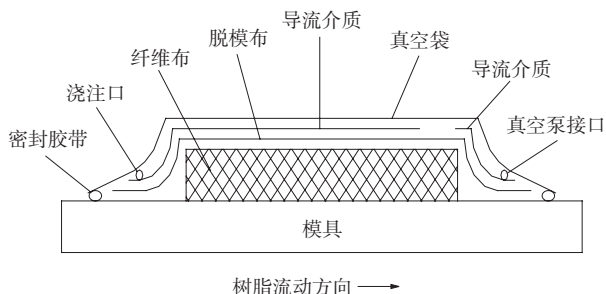


图1 VARTM装置示意图

^{*} 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:2014-02-15

基体无法有效传递增强纤维中受到的力,因此也不利于提高复合材料的综合性能^[4-6];空隙主要存在于树脂基体与增强纤维的界面上,会降低复合材料中树脂基体与增强纤维所形成的界面粘合力,严重时会造成复合材料的分层现象,对复合材料制品的综合性能影响很大^[7-10]。

笔者研究了 VARTM 工艺中导流介质的尺寸对树脂在纤维增强体中流动行为的影响,以及对复合材料制品中纤维分布和空隙率大小的影响,为实际生产中制品质量的改善提供有益的参考依据。

1 实验部分

1.1 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: Vacuum film 400Y,上海沥高科技有公司;

密封胶带: LG150,上海沥高科技有公司;

高渗透导流介质: VI160,上海沥高科技有公司;

乙烯基双酚 A 改性不饱和聚酯树脂: TH110-350R,厦门维曼材料科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

真空泵: X-25 型,德国 Busch 公司;

树脂收集器: SJQ-10,厦门维曼材料科技有限公司;

数码高清摄像机: HDR-XR200 型,日本 SONY 公司;

真空调压阀: IRV20,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;

巴 克 尔 硬 度 计: GYZJ934-1, 美国 Barber-Colman 公司。

1.3 实验方案

为研究使用不同尺寸的导流介质对 VARTM 工艺中树脂流动行为及复合材料中纤维分布及空隙率的影响,进行了四组实验,方案设计如表 1 所示,实验铺放方式如图 2 所示。

表 1 实验方案设计

组别	导流介质尺寸 ($L_m \times W_m$)/mm	纤维增强体	
		尺寸 ($L_f \times W_f$)/mm	层数
I	150 × 270	300 × 300	6
II	200 × 270	300 × 300	6
III	250 × 270	300 × 300	6
IV	300 × 270	300 × 300	6

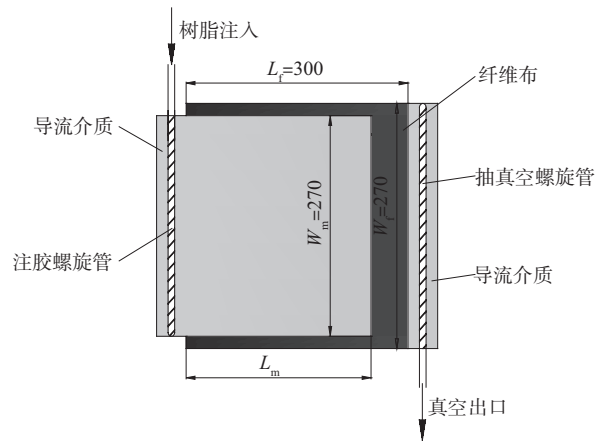


图 2 实验铺放方式

1.4 性能测试

(1) 树脂含量及玻璃纤维体积含量按 GB/T 2577-2005 测试,计算公式如式(1)、式(2)所示。

$$M_r = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (1)$$

式中: M_r ——树脂含量, %;

m_1 ——坩埚质量, mg;

m_2 ——坩埚和试样总质量, mg;

m_3 ——灼烧后坩埚和残余物总质量, mg。

$$V_f = \left(\frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times \frac{\rho_c}{\rho_f} \right) \times 100 = \frac{M_f \times \rho_c}{\rho_f} \times 100 \quad (2)$$

式中: V_f ——玻璃纤维体积含量, %;

ρ_c ——玻璃纤维增强塑料试样密度, g/cm³;

ρ_f ——玻璃纤维密度, g/cm³;

M_f ——玻璃纤维质量含量, %。

(2) 空隙率按 ASTM D2734-94 测试,计算公式如式(3)所示。

$$V = 100 - \rho_c \left(\frac{M_r}{\rho_r} + \frac{M_f}{\rho_f} \right) \quad (3)$$

式中: V ——空隙率, %;

ρ_r ——树脂密度, g/cm³。

2 结果与讨论

2.1 导流介质尺寸对树脂流动行为的影响

高渗透导流介质尺寸对树脂充模流动过程的影响如表 2 所示。

由表 2 可知,导流介质对树脂的导流作用非常明显,在纤维增强体尺寸和层数不变的情况下,导流介质长度从 150 mm 增加到 300 mm,对应完成充模所需的时间由 470 s 减少至 160 s,导流介质的尺寸增加一倍,对应的充模时间缩短近 2/3。

表2 导流介质尺寸对 VARTM 工艺中树脂充模流动过程的影响

组别	充填时间 / s		表层与底层充填时间差 / s	表底层流动前沿曲线交点坐标 / (s, mm)
	表层	底层		
I	470	430	40	(375, 227)
II	220	200	20	(175, 275)
III	147	165	-18	无
IV	110	160	-50	无

由表2还可知,随着导流介质尺寸的增加,树脂完成表层与底层充模所需的时间都越来越短,并呈现指数缩短趋势。

导流介质长度为150 mm和200 mm时,树脂充模流动前沿位置与时间的关系分别如图3、图4所示。

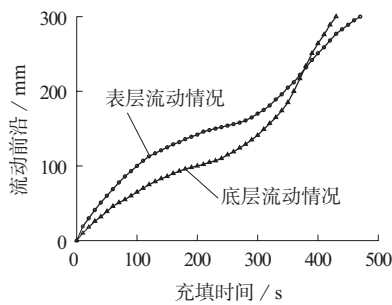


图3 导流介质长度为150 mm时树脂充模流动过程曲线

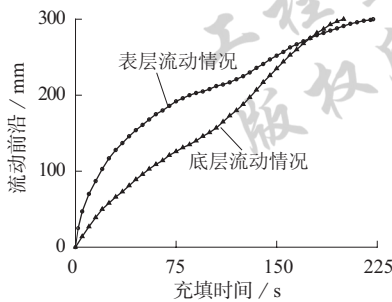


图4 导流介质长度为200 mm时树脂充模流动过程曲线

由图3、图4可知,在导流介质长度为150 mm和200 mm时树脂最终完成填充所需时间都是表层所需时间大于底层。在充模开始阶段,树脂在表层流动速度大于在底层的流动速度,这是由于开始阶段导流介质对树脂在表层的流动起着良好的导流作用。在树脂流动前沿流动至225 mm和275 mm处开始相交,随后树脂在底层流动速度逐渐快于在表层的流动速度,这是由于此时的流动处于没有导流介质辅助流动的阶段,树脂完全靠真空压力和重力的作用浸渍增强体,由于重力的作用,树脂首先向下渗漏浸渍增强体的底部并在真空负压的作用下沿着底部继续向前浸渍,因纤维增强体中存在缝隙和流动通道,树脂会再逐渐向上流动逐渐浸润增强体

的表层。

表层与底层的时间差从40 s缩短至20 s,实验结果表明随着导流介质尺寸的增加,树脂充模过程中表层流动与底层流动时间差逐渐减少,并有赶超底层流动的趋势。在导流介质长度为250 mm和300 mm时,其流动过程中前沿位置与时间的关系如图5、图6所示。

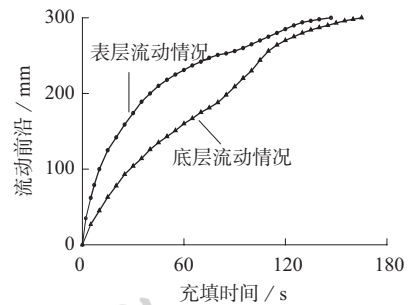


图5 导流介质长度为250 mm时树脂充模流动过程曲线

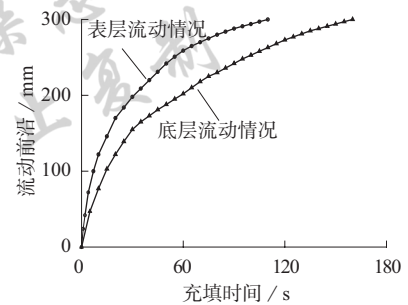


图6 导流介质长度为300 mm时树脂充模流动过程曲线

由图5、图6可知,在导流介质长度为250 mm和300 mm时,树脂在充模过程中表层流动速度始终大于底层流动,表层与底层的差距呈现出逐渐拉大的趋势,这是由于随着导流介质尺寸的增加,它对树脂的导流作用更加显著,使得树脂在表层流动前沿位置在相同时刻情况下始终大于底层流动的前沿位置。

观察在使用四种不同尺寸导流介质条件下制得的复合材料制品,发现前三个制品(组别I、II和III)的外观光滑平整,无明显气泡干斑等缺陷;第四个制品(组别IV)的内部有明显孔洞以及气泡等缺陷。这是由于导流介质尺寸大,树脂在其导流作用下快速向前流动,未能充分浸润纤维增强体,以及由于流动速度过快,气泡未能及时排除,导致大量气体被残留和包裹在制品中,如图7所示。

2.2 导流介质尺寸对复合板材纤维分布的影响

使用不同尺寸的导流介质情况下,不同组别制得的复合板材中纤维平均体积分含量如表3所示。

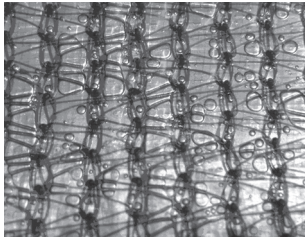


图 7 导流介质长度为 300 mm 时未排除的气泡残留图

表 3 导流介质尺寸对复合板材中纤维体积分含量的影响

组别	纤维体积分含量平均值 / %
I	50.26
II	46.71
III	50.90
IV	54.08

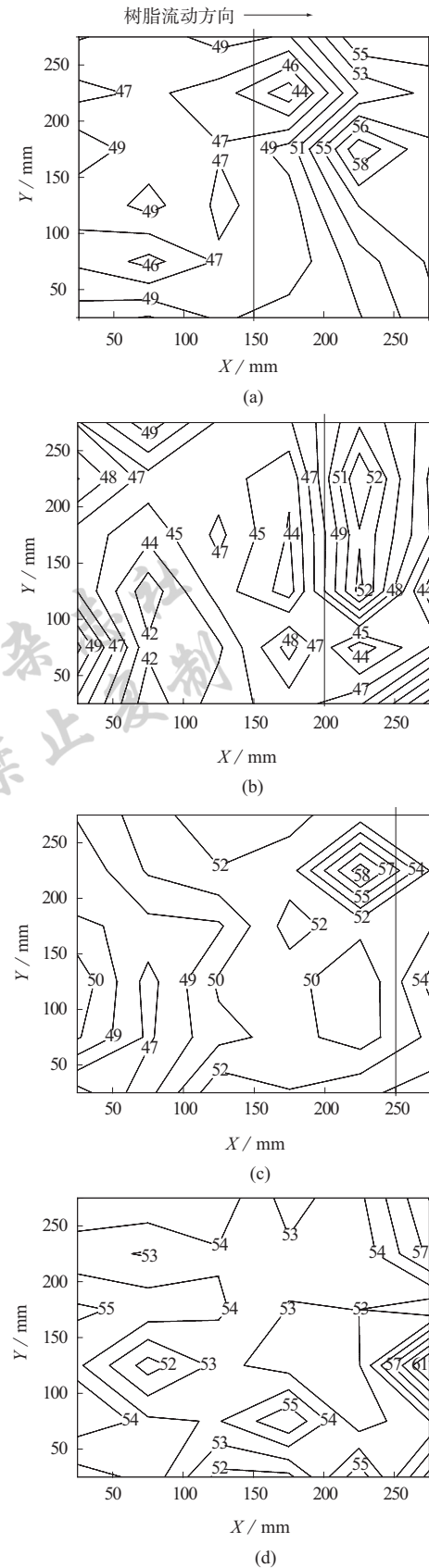
由表 3 可知,随着导流介质尺寸的增加,复合板材中纤维体积分含量呈现先减少后增加的趋势。导流介质长度从 150 mm 增加到 200 mm,对应的纤维体积分含量从 50.26% 降低到 46.71%,这是由于导流介质尺寸的增加促进了树脂在纤维增强体中的流动和浸润,使得树脂较充分地浸渍纤维增强体,从而树脂含量得到提高,对应的纤维体积分数降低。继续增加导流介质的尺寸,纤维体积分含量又逐渐变大,这是由于导流介质的尺寸进一步增加,使得整个密闭模腔中的排气通道增多,进而模腔中的压力梯度变大,增强体变得更加密实,制得的复合板材中的纤维体积分含量也就逐渐变大,这一结果从复合板材的厚度变化也得到印证:随着导流介质尺寸的增加,复合板材的厚度有逐渐变薄的趋势。

图 8 为使用不同尺寸导流介质情况下纤维体积分含量分布图。

由图 8 可知,四种复合板材均有一个相同的现象,导流介质覆盖区域与非覆盖区域之间有一条明显的分解线,即以导流介质的尺寸边界线为分界。边界线左边的纤维增强体有导流介质覆盖,此区域的纤维体积分含量较小,而边界线右边的区域无导流介质覆盖,纤维体积分含量较大。这是由于在导流介质覆盖区域,有利于树脂流动和对纤维增强体的浸润,使得纤维体积分含量较小;而在无导流介质覆盖区域,树脂浸润困难,导致纤维体积分含量相对变大。

2.3 导流介质尺寸对复合板材空隙率的影响

纤维增强复合材料制品中一般都含有空隙。空隙主要存在于树脂和纤维的界面上,导致树脂和纤维粘合不良,产生分层将会严重损害制品的性能。实验发现,当空隙含量增加 5% 时,层合板的层间剪切性能会比无空隙时下降 20% 左右。因此研究空



a—I 组; b—II 组; c—III 组; d—IV 组

图 8 使用不同尺寸导流介质时制品的纤维体积分含量分布图

隙率的影响因素非常重要,对提高制品质量有重要意义。

空隙形成有以下两个方面的原因,一是纤维束内部的渗透率比纤维束间及导流介质层低得多,树脂首先包围纤维束,把空气裹在纤维束里面形成空隙;二是由树脂和固化剂反应放气形成空隙。

在不同尺寸导流介质情况下制得的复合板材空隙率的含量见表4。

表4 导流介质尺寸对复合板材空隙率的影响

组别	空隙率平均值/%
I	5.84
II	6.45
III	3.86
IV	19.92

由表4可看出,随着导流介质长度的增加,复合板材的空隙率先从5.84%增加到6.45%,接着从6.45%减少到3.86%,最后又急剧增加到19.92%的高含量水平。

这是由于随着导流介质尺寸的增加,促使树脂流动速度加快,树脂对纤维浸润不充分,使得纤维中空隙率逐渐变大;导流介质尺寸进一步增加,抽气通道增加,使得整个密闭空间压力梯度变大促使树脂更好地流动,纤维增强体得到的浸渍相对更好,整个复合材料板的空隙率变小;当导流介质完全覆盖纤维增强体时,导流介质对树脂流动起着决定性作用,一方面树脂在纤维增强体表面流速加快,没有足够时间充分浸润增强体;另一方面由于表层与底层充模前沿差距很大,造成气泡无法及时排出而被包裹在制品中,因此制品中的空隙率急剧增大,严重影响制品性能。

3 结论

(1) 在VARTM工艺中导流介质的尺寸对树脂在纤维增强体中的流动速度与浸润起着至关重要的作用,并呈现出随着导流介质尺寸的增加,树脂完成充填所需时间呈指数缩短趋势。

(2) 随着导流介质尺寸的增加,复合材料制品中纤维体积含量呈现先减小后变大的趋势。在导流介质覆盖区域与未覆盖区域之间形成分界,覆盖区域纤维含量较低,未覆盖区域纤维含量相对较高。

(3) 导流介质尺寸对复合材料制品的空隙率影响明显,随着尺寸的增加制品中空隙率呈现先增大后减小再加速增大的趋势,在导流介质长度从250 mm增加到300 mm时,空隙率从3.86%大幅增加到19.92%,呈现出加速变大的趋势。

参考文献

- [1] 赵渠森,赵攀峰.真空辅助成型技术(一)[J].高科技纤维与应用,2002(3):22-27.
Zhao Qusen, Zhao Panfeng. Vacuum assisted resin infusion(one)[J]. Hi-tech Fiber & Application, 2002(3):22-27.
- [2] 秦泽云,张咏,许国栋,等.VARTM工艺增强纤维浸润性能研究[J].绝缘材料,2011(6):28-31.
Qin Zeyun, Zhang Yang, Xu Guodong, et al. Wettability of reinforcing fiber in VARTM process[J]. Insulating Materials, 2011(6):28-31.
- [3] 牛天军.经编轴向缝合复合材料树脂流动浸润性能及其力学性能研究[D].上海:东华大学,2008.
Niu Tianjun. Study on resin flowing behavior and impregnation in biaxial warp knitting stitched perform and mechanical properties of its composites[D]. Shanghai: Dong Hua University, 2008.
- [4] 石宝,张林彦.玻璃纤维复合材料纤维体积分量的测定方法[J].上海纺织科技,2012(9):61-62.
Shi Bao, Zhang Linyan. Determination method of the fiber volume of glass fiber composites[J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2012(9):61-62.
- [5] 高峰,姚穆.纤维体积含量对纤维增强复合材料拉伸断裂强度影响[J].纺织学报,1996(1):4-7,3.
Gao Feng, Yao Mu. Effect of fibre volume content on tensile breaking strength of fibre reinforced composite[J]. Journal of Textile Research, 1996(1):4-7, 3.
- [6] 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.
- [7] 李萍.RTM制品缺陷分析与表征[D].武汉:武汉理工大学,2007.
Li Ping. Analysis and characterization of defects in RTM products[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [8] 郑澎,张彦飞,赵贵哲,等.真空辅助RTM工艺中空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.
- [9] Rachmadini Y, Tan V B C, Tay T E. Enhancement of mechanical properties of composites through incorporation of CNT in VARTM—A review[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2010, 29(18):2 782-2 807.
- [10] Bender D, Schuster J, Heider D. Flow rate control during vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) processing[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(13):2 265-2 271.