

泡沫夹层结构 VARI 工艺中树脂流动行为的研究

赵晨辉 张广成 李莎莎

(西北工业大学理学院,西安 710072)

摘要 采用可视化实验方法研究了泡沫夹层结构真空辅助成型工艺(VARI)中树脂的流动行为。结果表明,导流介质的存在可以明显提高树脂的流动速率;剥离布可使得复合材料泡沫样板表面光滑平整,并可明显提高充模速率,减少充模时间;增加浇注口数目可明显缩短充模时间,并可获得浸渍均匀、沟槽全满的样板。采用真空点源布局 B 时的树脂流动速率大于真空点源布局 A,但布局 B 的充模过程易产生白斑,其所需的浇注时间要比布局 A 稍长。

关键词 真空辅助成型 泡沫夹层结构 泡沫沟槽 树脂流动行为

泡沫夹层结构复合材料是一种比强度和比刚度
高、比密度低的先进复合材料,广泛应用于航空航
天、运载火箭、风力发电叶片等。然而,其较高的成本
使得建筑行业、汽车行业等领域望而却步,于是真
空辅助成型工艺(VARI)应运而生^[1-2]。它是基于
树脂传递模塑工艺发展起来的一种新型成型工艺,
具有成本低、环境友好、效率高、性能好等优点,更适
合于大厚度、大尺寸制件^[3-5]。其主要过程是在单
面刚性模具上以柔性真空袋膜包覆、密封纤维增强
材料,真空负压下排除模腔中的气体,利用树脂的流
动、渗透实现树脂对纤维及其织物的浸渍,并在室温
和真空压力下固化,形成具有一定树脂/纤维比例的
复合材料^[6-7]。

研究 VARI 的关键在于树脂流动行为的掌握与
控制。然而,导流介质、浇注口数量、剥离布、真空点
源布局等一系列因素使得树脂充模过程的流动异常
复杂,因此对树脂流动行为的研究具有相当难度。
笔者对泡沫夹层结构复合材料 VARI 工艺过程中导
流介质、浇注口数量、剥离布、真空点源布局等因素
对树脂的流动行为影响规律进行了研究,以期优化
工艺流程,并对实际应用提供一定的理论依据。

1 实验部分

1.1 实验材料和样板

实验所用树脂为双酚 A 型环氧树脂(EP),固化
剂为多胺类固化剂,泡沫芯材为聚甲基丙烯酸酰胺
(PMI)泡沫、聚氯乙烯(PVC)泡沫。PMI 泡沫样板
长宽均为 158 mm,厚度为 20 mm;PVC 泡沫样板长
宽均为 159 mm,厚度为 20 mm。其中 PMI 泡沫样板
的主沟槽宽为 2 mm,深 18 mm,槽间距为 40 mm,上
下表面引流槽宽、深均为 2 mm,上表面引流槽间距
为 20 mm,下表面引流槽间距为 40 mm,如图 1 所
示。PVC 泡沫样板主沟槽宽 1 mm,深 18 mm,槽间

距为 40 mm,引流槽宽、深均为 2 mm,上下表面引流
槽间距均为 20 mm,如图 2 所示。

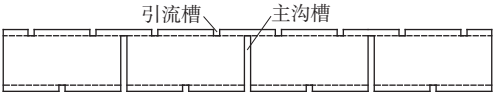


图 1 开槽 PMI 泡沫样板正视图

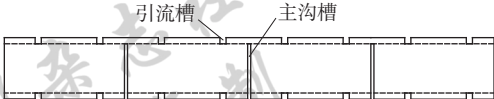
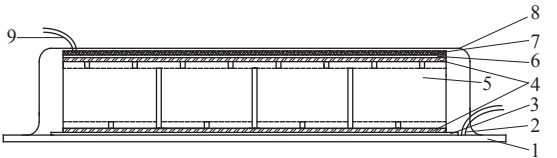


图 2 开槽 PVC 泡沫样板正视图

辅助材料为玻璃纤维布、聚对苯二甲酸乙二酯
薄膜、剥离布、导流介质、真空袋、密封胶带、聚四氟
乙烯管,实验仪器为真空泵。

1.2 实验方法

为了研究树脂在真空辅助泡沫沟槽中的流动规
律,笔者设计了 4 组对比实验以研究导流介质、剥离
布、浇注口、真空点位置对树脂流动过程的影响。所
用实验模具为透明玻璃平板,可以观测和记录泡沫
芯上、下表面树脂流动情况,实验装置如图 3 所示。



1—玻璃模具; 2—真空点源; 3—脱模布; 4—玻纤维织布;
5—泡沫塑料; 6—剥离布; 7—导流网; 8—真空袋; 9—树脂点源

图 3 实验装置图

2 结果与讨论

2.1 导流介质对树脂流动过程的影响

导流介质是多孔介质,通常铺放在预成型体表
面用以提高树脂充模速率、缩短充模时间。为此研
究了导流介质对树脂充模时间的影响,结果如表 1
所示。由表 1 可以发现,无论是用 PVC 泡沫还是

PMI 泡沫样板, 导流介质均可大幅度缩短树脂充模时间。这与文献研究结果一致^[8-9]。由表 1 还可以发现, 浇注口数量为 1、2、3 时导流介质均起到了缩短充模时间的作用, 且浇注口越少缩短的幅度越大。以浇注口数量为 1 的 PMI 泡沫样板为例, 由表 1 可知无导流介质时充模时间为 5367 s, 而有导流介质时仅为 1 120 s, 几乎缩短为原来的 1/5。由此可见, 导流介质对提高树脂流动速率、减少充模时间起着至关重要的作用。实验还表明, 在泡沫样板表面的沟槽为树脂流动提供快速通道的基础上^[10], 导流介质的存在可进一步加速树脂的充模过程。

表 1 导流介质及浇注口对充模时间的影响

泡沫样板类型	导流介质层数	浇注口数量	充模时间 /s
PMI 泡沫	0	1	5367
		2	750
		3	314
	1	1	1120
		2	216
		3	198
PVC 泡沫	0	1	5234
		2	738
		3	245
	1	1	2244
		2	304
		3	200

比较导流介质对 PMI 和 PVC 泡沫样板中树脂流动过程的影响时发现, 尽管 PMI 泡沫的主沟槽宽 (2 mm) 大于 PVC 泡沫的宽度 (1 mm), 但无导流介质时 PMI 泡沫样板的充模时间大于 PVC 泡沫, 这可能是由于 PVC 泡沫下表面引流槽间距 (20 mm) 比 PMI (40 mm) 的小所致。铺放导流介质时 PMI 泡沫的充模时间小于 PVC 泡沫, 其原因可能为导流介质与 PMI 泡沫沟槽的联合作用大于与 PVC 泡沫沟槽的联合作用。

2.2 浇注口数量对树脂流动过程的影响

浇注口的数量直接决定着树脂的宏观流动方式, 从而影响到树脂的充模时间。为此研究了浇注口数量为 1、2、3 时树脂的流动方式及充模时间, 如表 1 所示。实验发现, 采用 1 个浇注口时, 树脂易被抽入真空管中, 使得树脂不能充满主沟槽, 且单个浇注口充模时间长, 易产生大量白斑。

采用 2 或 3 个浇注口可明显改善充模质量。实验过程发现采用 2 或 3 个浇注口时树脂以浇注口为中心向前流动, 几分钟之内即可将沟槽注满, 浇注过程中出现少量白斑, 但白斑很快消失。从表 1 可以看出, 采用 2 或 3 个浇注口可以明显缩短充模时间。以 PMI 泡沫为例, 无导流介质时, 采用 3 个浇注口

时的充模时间为采用 1 个浇注口时的 1/17; 有导流介质时, 3 个浇注口时的充模时间为 1 个浇注口时的 1/6。

2.3 剥离布对树脂流动过程的影响

剥离布的主要作用是便于复合材料模塑件与导流介质的分离, 并且可以使得复合材料样板表面光滑平整。但是剥离布对充模时间有两方面影响: 一方面剥离布增加了厚度方向树脂流动的阻力, 延长了充模时间; 另一方面, 剥离布降低了导流介质与玻璃纤维增强材料之间的压紧效应, 避免了玻璃纤维在导流介质的网格中与真空袋直接贴死, 从而提高了玻璃纤维的渗透率, 提高了树脂的流动速率^[9]。表 2 所示为剥离布对充模时间的影响。从表 2 可以看出, 对于 PMI 泡沫, 铺放剥离布时, 树脂的充模时间由 487 s 缩短到 294 s; 对于 PVC 泡沫, 铺放剥离布时, 充模时间由 265 s 缩短到 201 s。这表明剥离布放置 1 层时, 其第二种作用要远远大于前一种作用, 即剥离布可以提高充模速率, 这和文献资料的研究结果一致^[9]。

表 2 剥离布对充模时间的影响

泡沫样板类型	剥离布层数	充模时间 /s
PMI 泡沫	0	487
	1	294
PVC 泡沫	0	265
	1	201

2.4 真空点源布局对树脂流动过程的影响

设计了两种真空点源布局, 以便进一步研究真空点源布局对树脂流动行为的影响。布局 A 表示真空点源在玻璃板上, 如图 4 所示; 布局 B 表示真空点源在样板顶部, 如图 5 所示。

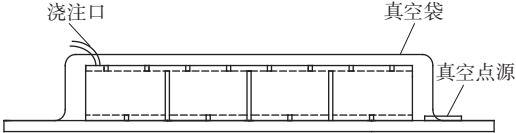


图 4 布局 A: 真空点源在玻璃板上

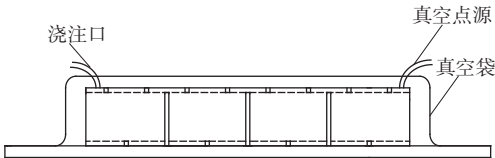


图 5 布局 B: 真空点源在样板顶部

(1) 真空点源为布局 A 时, 树脂在真空负压作用下, 通过导流介质和剥离布、泡沫板中的主沟槽进入下方引流槽中流动, 且流动较快。当树脂将下方主沟槽充满后开始进入真空管, 树脂在泡沫板上面流动缓慢, 浇注 90 min 才将上层玻璃布完全浸透。

原因可能是树脂在泡沫沟槽及边缘受到的阻力小,使得树脂沿着沟槽和边缘流入真空管中,树脂在样板上方流动速度变慢。图6为两种布局下树脂在泡沫样板沟槽中的流动前锋距离与时间关系曲线。从图6中曲线斜率可以看出,在布局A下,树脂在泡沫导流槽中的流动速率开始较快,一段时间后,树脂流速变慢,这种现象可能是由泡沫板对于树脂的阻力和外加压差之间的关系来决定的,树脂流动到一定距离后,阻力总和与外加压强相等,树脂没有流动的动力源,因而树脂流动变慢或流动停止^[11]。

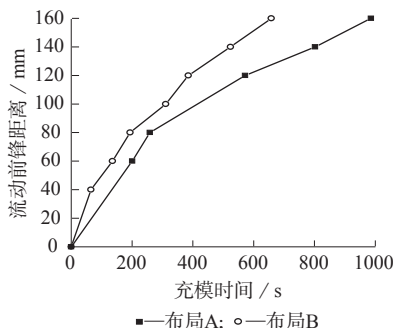


图6 两种布局下树脂在泡沫样板沟槽中的流动前锋距离与时间关系曲线

(2) 真空点源为布局B时,实验过程发现树脂沿样板下方沟槽流动速率较快,且由于抽真空的作用,样板树脂通过样板中的开孔反渗透到样板上方,这样就在样板上方形成较多白斑。图7所示为43 min时样板表面形成的白斑。当浇注时间延长至56 min时,白斑明显变淡,浇注1 h后白斑消失。这是因为树脂在样板下方的流动速率明显高于样板上方树脂流动速率,如图8所示。因此当样板下方沟槽注满后,树脂被抽入真空管中,样板上方格子中间很难再被充满,导致大量白斑的产生。对比图6中的两条曲线可以发现,相同时间时布局B中的树脂流动前锋比布局A的要长,这说明布局B的树脂流动速率相对较快。但为了消除白斑,采用布局B时所需要的浇注时间比布局A要稍长一些。

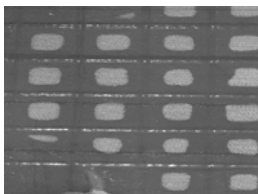


图7 充模43 min时样板顶部的白斑

3 结论

(1) 导流介质的存在可以明显提高树脂的流动速率,减少充模时间。

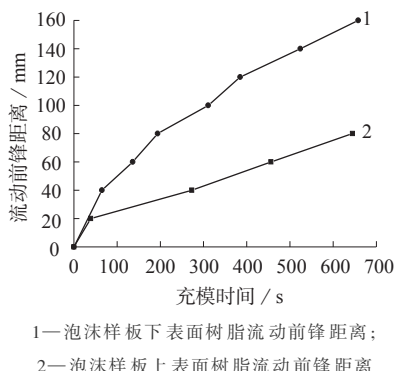


图8 泡沫样板在上下表面的树脂流动前锋距离与时间关系曲线

(2) 剥离布可使得复合材料样板表面光滑平整,并可明显提高充模速率,减少充模时间。

(3) 采用多个浇注口浇注树脂可明显缩短充模时间,并可获得浸渍均匀、沟槽全满的样板。

(4) 真空点源布局直接影响了对树脂流动模式及速率。真空点源为布局B时的树脂流动速率高于布局A,但布局B时样板下方沟槽中的树脂易反渗透到样板上方,所以布局B的充模过程易产生白斑,为了消除白斑,其所需要的浇注时间比布局A稍长一些。

参考文献

- [1] 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,2010,25(3):99-105.
- [2] 武玉芬,张博明.真空辅助成型工艺的树脂分析与模拟[J].材料开发与应用,2009,24(6):67-71.
- [3] 赵晨辉,张广成,张悦周.真空辅助树脂注射成型(VARI)研究进展[J].玻璃钢/复合材料,2009,(1):80-84.
- [4] 孙静,段跃新,肇研,等.真空渗透成型工艺制件厚度变化规律[J].复合材料学报,2010,27(3):86-91.
- [5] Park C H, Saouab A. Analytical modeling of composite molding by resin infusion with flexible tooling: VARI and RFI processes[J]. Journal of Composite Materials, 2009, 43(18): 1877-1900.
- [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.
- [7] 吴忠友,孙祖莉,李年.FRP真空辅助成型工艺实验研究[J].玻璃钢/复合材料,2010(4):62-64.
- [8] 杨金水,肖加余,曾竟成,等.导流介质对真空导入模塑工艺树脂流动行为的影响[J].复合材料学报,2010,27(4):1-8.
- [9] 张锐,郑威,袁秀梅,等.复合材料的真空辅助成型工艺研究[J].工程塑料应用,2005,33(6):33-35.
- [10] Zhu Yingdan, Deng Jinglan, Wang Jihui, et al. Vacuum infusion molding process(Part2 VIMP based on grooves) [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2003, 18(4): 68-71.
- [11] 刘洪政,陈南梁,刘晓明.夹芯材料在VARTM工艺中的使用研究[J].东华大学学报(自然科学版),2008,34(2):159-163.

STUDY OF RESIN FLOW BEHAVIOR IN VARI MOLDING PROCESS OF FOAM SANDWICH COMPOSITE MATERIALS

Zhao Chenhui, Zhang Guangcheng, Li Shasha

(School of Natural and Applied Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT The resin flow behavior in vacuum assisted resin infusion molding process(VARI) of foam sandwich materials was studied through visualization flow experiments. The results showed that diversion nets could improve the flow rate of the resin. Stripping cloth could make the surface of composite foam board to become smooth and improved the flow rate of the resin, shortened the filling time. Increasing the amount of injection port could significantly shorten the filling time and obtain a board with uniform soaking and full-filling plow groove. The flow rate of the resin with adopting layout B of vacuum point source was higher than layout A, but the filling process of layout B brought white spot easily, so the pouring time of layout B was slight longer than layout A on the contrary.

KEYWORDS vacuum assisted resin infusion molding process, foam sandwich, foam plow groove, resin flow behavior

《工程塑料应用》2010 年度优秀科技论文获奖名单

为进一步提高《工程塑料应用》的办刊质量,推动塑料行业的技术进步与发展,培养和激励广大科技人员的创新精神,引导广大科技工作者撰写高质量的科技论文,我社今年开展了第一届“优秀科技论文评选活动”。本着“公平、公正、公开”的原则,由我社组织专家对刊登在本刊 2010 年第 1 ~12 期上的科技论文进行了评审,最终评选出 10 篇优秀科技论文,分别为(按刊登期号顺序排列):

1. 中国石油天然气股份有限公司石油化工研究院兰州化工研究中心的丛日新、梁滔、郑红兵等撰写的《连续本体法合成 ABS 树脂》(2010 年第 1 期);
2. 华东理工大学、上海亨斯迈聚氨酯有限公司的陈军、吴唯、陈玉洁等撰写的《PA6/PC 合金的网络结构化增韧》(2010 年第 2 期);
3. 四川大学的吴显、郭超、钱心远等撰写的《振动注射成型对聚合物性能的影响》(2010 年第 4 期);
4. 华东理工大学的江建第、徐海波、李宇岩等撰写的《PP/EOR 合金的可控膨胀及光(热)致变形研究》(2010 年第 5 期);
5. 北京化工大学的毕超、闫新华、付志峰等撰写的《连续混炼装备混合性能的对比研究》(2010 年第 6 期);
6. 西北工业大学的晁敏、寇开昌、吴广磊等撰写的《PA 封端型聚酰亚胺的合成与表征》(2010 年第 8 期);
7. 北京化工大学、清华大学的贾明印、薛平、于建等撰写的《长纤维增强热塑性复合材料技术与设备的研究》(2010 年第 10 期);
8. 郑州大学的郑丽娜、吕亚男、魏金刚等撰写的《PET/R - MFMB/GF 复合材料的结构及力学性能研究》(2010 年第 11 期);
9. 中国兵器工业集团第五三研究所的李晖、张霞、付建农等撰写的《尼龙 66 人工光老化性能研究》(2010 年第 12 期);
10. 金发科技发展有限公司、泛亚汽车技术中心有限公司的陈延安、杨波、周英辉等撰写的《耐划伤车用聚丙烯材料的研制及应用》(2010 年第 12 期)。

在此,向获奖的作者表示祝贺,并希望大家继续踊跃投稿,支持我刊的发展。

关于开展《工程塑料应用》2011 年度优秀科技论文评选活动的通知

《工程塑料应用》是由中国兵器工业集团第五三研究所、中国工程塑料工业协会等单位主办的全国性塑料专业技术类期刊(月刊),是中国工程塑料工业协会会刊。多年来,在各级领导、编委及广大作者、读者的关怀支持下,《工程塑料应用》屡获国家、省部级优秀期刊评比的最高奖项,连续五届荣获国家期刊评比最高奖项,是全国仅有的 7 种“五连冠”科技期刊之一,并荣获“新中国 60 年有影响力的期刊奖”等奖项。

为进一步提高《工程塑料应用》的办刊质量,推动塑料行业的技术进步与发展,培养和激励广大科技人员的创新精神,引导广大科技工作者撰写高质量的科技论文,我社决定在成功举办 2011 年度“优秀科技论文评选活动”的基础上,2012 年将继续开展“优秀科技论文评选活动”。

优秀科技论文应具备的条件为:(1)具有独到见解、创新观点,达到国际先进或国内领先水平,具有前瞻性,对本行业技术进步有积极促进作用;(2)成果开发前景和实用价值很大,理论指导作用明显;(3)对“十一五”塑料行业发展有促进作用,对“十二五”塑料行业发展有支撑作用;(4)符合国家产业发展政策;(5)符合国家法律法规要求。

本活动将本着“公平、公正、公开”的原则,由我社组织专家进行评审,从刊登在本刊 2011 年第 1 ~12 期上的科技论文中评选出 10 篇优秀科技论文,对评选出的 2011 年优秀科技论文名单在《工程塑料应用》杂志、“工程塑料网”(www.epa1973.com)上公布,并在由中国工程塑料工业协会加工应用专委会组织的“2012 年中国工程塑料复合材料技术研讨会”上对获奖论文作者现场颁发荣誉证书。

杂志的发展离不开您的关注、支持,行业的进步同样离不开您的参与,我们期待您的投稿!