

文章编号: 1000-3851(2003)04-0111-06

沟槽型真空注射成型工艺的研究

李新华¹, 祝颖丹¹, 王继辉¹, 高国强²

(1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 武汉 430070; 2. 北京玻璃钢研究设计院, 北京 102101)

摘要: 真空注射成型工艺是一种新型的复合材料液体模塑成型工艺, 对沟槽型真空注射成型工艺开展了实验研究, 通过充模实验确定了引流槽的宽度、深度和槽间距及主槽的槽间距等工艺参数并进行了优化; 对影响充模过程的各种因素进行了详细的讨论, 并以夹芯面板的制作实例阐述了沟槽型真空注射成型的工艺过程。

关键词: 真空注射成型; 沟槽; 充模过程

中图分类号: TB332 文献标识码: A

STUDY ON VACUUM INFUSION MOLDING PROCESS BASED ON GROOVES

LI Xinhua¹, ZHU Yingdan¹, WANG Jihui¹, GAO Guoqiang²

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Beijing FRP Research and Design Institution, Beijing 102101, China)

Abstract: The vacuum infusion molding process is becoming popular as a new type of Liquid Composites Molding Processes. In the paper, the vacuum infusion molding process based on grooves was investigated by experiments, and the parameters of width, depth and spacing for flow grooves and spacing for supply grooves were optimized according on the molding experiments and various factors that had influence on the mold filling process were discussed. Furthermore, the whole vacuum infusion procedure is introduced in detail, taking the manufacture of a sandwich panel in one infusion for a case.

Key words: vacuum infusion molding process; grooves; mold filling process

近十年来, 大型、复杂复合材料结构件的成型技术取得了较大的进展。其突出的特点是采用了真空辅助成型工艺, 其中包括一系列的专利和商业化技术。传统的复合材料成型工艺在技术和环保等方面的问题日趋严重, 极大地影响了复合材料的广泛应用, 必须开发新的制造技术以降低成本、提高工艺重复性和保护环境等。因此, 综合性能优良、低成本、高效率的环保型真空注射成型工艺(VIMP, Vacuum infusion molding process)应运而生。该工艺可应用于船舶、基础结构工程、交通运输以及国防建设等领域, 具有很好的发展前景^[1~4]。

根据树脂的分配系统, 可将真空注射成型工艺

分为两种: 一种是高渗透介质型, 另一种是沟槽型。前者设计相对灵活且简单, 但一些材料如剥离层、高渗透介质等不能重复使用, 不仅产生了固体废弃物且增加了生产成本, 充模速度也相对较慢; 后者则可克服这些缺点, 不需要高渗透介质和剥离材料, 同时沟槽的渗透率远远高于高渗透介质, 充模速度得到大幅度的提高, 特别适合于大型、加筋和夹芯异型结构件的制备^[5~7]。笔者对沟槽型真空注射成型工艺进行了实验研究。

1 实验材料

不饱和树脂: 金陵帝斯曼 Palatal P6-988KR, 粘

度特性见表 1。

引发剂: 过氧化甲乙酮 (MEKP), Butanox M-50, 活性氧含量 8.9 %, AKZON NOBEL Co.

促进剂: 环烷酸钴 (CoNap), 异辛酸钴含量 10 %, Co^{++} 含量 1 %, 紫红色液体, 工业级, 北京玻璃钢研究设计院。

增强材料: 复合毡和缝编毡。

真空袋: Wrightlon 7400 和 Stretchlon 200, AIRTECH。

剥离层: Stitch Ply A, AIRTECH。

表 1 树脂粘度

Table 1 Resin viscosity

温度/	25	30	35	40	45	50	55
粘度/ cp	300.5	215	161	124	99.3	79.5	66.3

2 实验

沟槽型真空注射成型工艺适合于制作单面或中间带夹芯的制品, 在芯材表面布设流道, 树脂通过流道快速充模。沟槽型工艺通常有三种基本的结构形式, 如图 1 所示。先将带沟槽的芯材(或纤维预成型体)置于模具上, 再铺上纤维预成型体(或带沟槽的芯材), 然后将整个模具用真空袋密封。

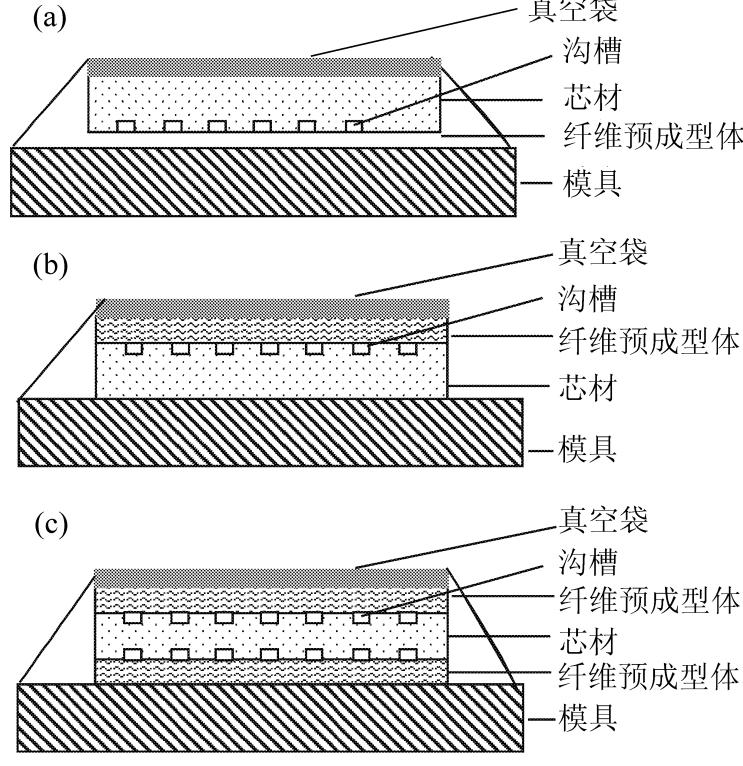


图 1 沟槽型真空注射成型工艺的基本结构形式

Fig. 1 Basal assemblies of vacuum infusion molding process based on grooves

一般芯材都在可选范围内, 如轻质木材、PVC、PEI 和其它线性微孔封闭型塑料等。对于开孔型芯材(如蜂窝状), 树脂会充满其空腔, 加重了制品的重

量和成本, 这类芯材不能选用。实验选用轻质木板作为芯材^[8, 9]。

2.1 沟槽设计

2.1.1 沟槽布局的选择

沟槽的布局主要有两种方式, 如图 2 所示。

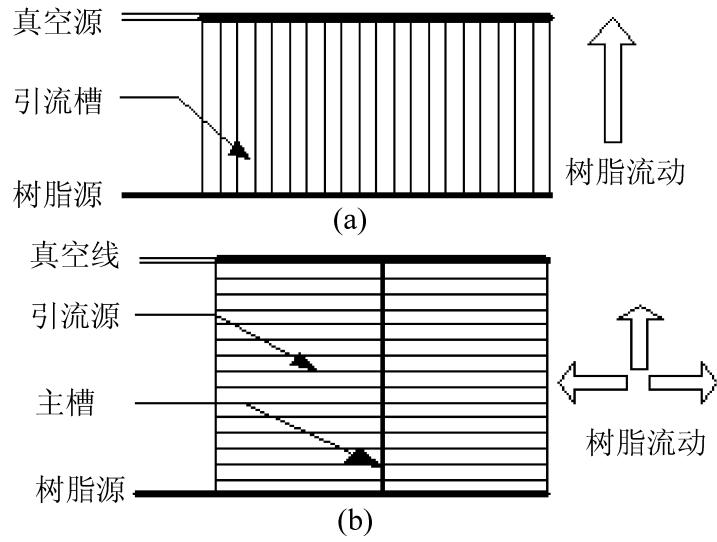


图 2 沟槽布局

Fig. 2 Grooves patterns

布局图 2(a) 中, 在 11 cm × 25 cm 板材的宽度方向加工为间距 2 cm、宽 3 mm 和深 2 mm 的引流槽, 采用沟槽型真空注射成型工艺的基本结构形式图 1(a), 预成型体为 4 层复合毡, 实验结果发现大部分树脂从沟槽流向真空线, 而不是浸渍预成型体。留下多处干点未浸透, 如图 3 所示。这种布局容易产生过快的树脂流动和干点, 因此不可取, 下面对布局图 2(b) 进行具体的实验研究。

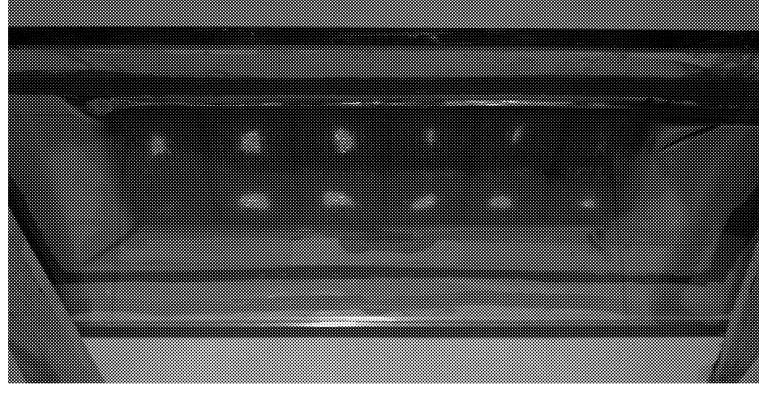


图 3 沟槽布局 1(a) 中产生的干点

Fig. 3 Dry points in groove pattern 1(a)

2.1.2 引流槽的设计

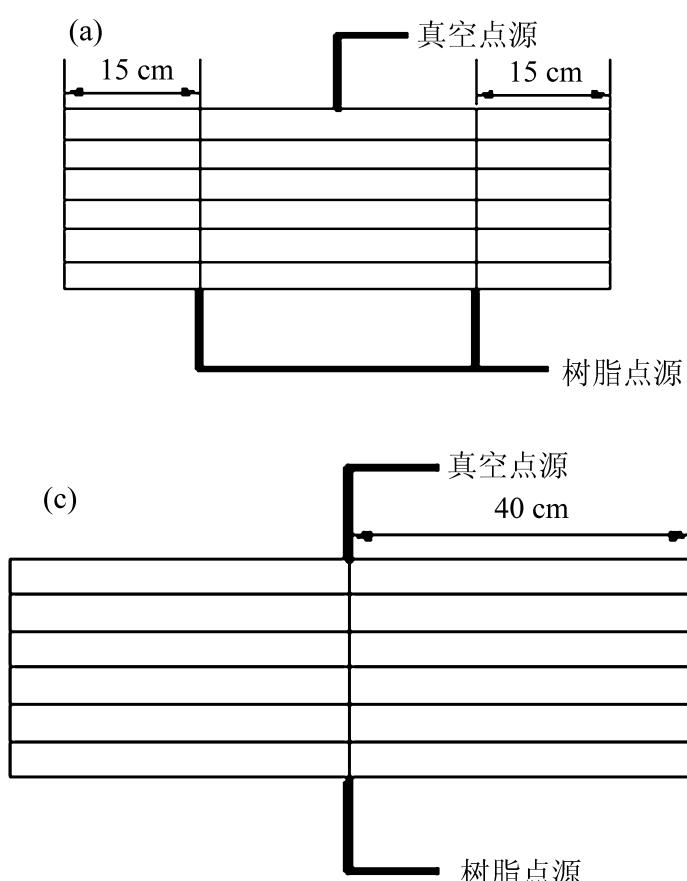
对于沟槽布局图 2(b) 而言, 需要确定的主要参数是引流槽的宽度和深度, 及引流槽间的间距和主槽间的间距。为此, 进行了多组小尺度的沟槽型真空注射成型实验。真空袋下的主要材料尺寸均为 11 cm 宽, 25 cm 长。引流槽按一定的间距刻在板材的宽度方向, 一条主槽则刻在板材的纵轴上。加有 1.0 % MEKP 和 0.6 % CoNap 的树脂从主槽的一端注入, 真空点源则设在主槽的另一端。预成型体为 4 层复合毡。采用沟槽型真空注射成型工艺的基本

结构形式图 1(a) 和图 1(b)。实验设计和结果见表 2。

表 2 小尺度沟槽型真空注射成型工艺实验
Table 2 Small scale experiments for vacuum infusion molding process based on grooves

实验编号	引流槽			主槽		基本结构形式	充模时间/s
	宽/mm	深/mm	间距/mm	宽/mm	深/mm		
1	3	2	2	3	2	a	133
2	3	2	2	3	2	b	
3	3	2	4	3	2	a	
4	3	2	4	3	2	b	
5	4	3.5	2	5	3.5	a	30
6	4	3.5	2	5	3.5	b	39
7	4	3.5	4	5	3.5	a	36
8	4	3.5	4	5	3.5	b	46
9	4	3.5	6	5	3.5	a	203
10	4	3.5	6	5	3.5	b	233

开始时, 将主槽定为宽 3 mm、深 2 mm, 引流槽定为宽 3 mm(低于 3 mm 不便于加工)、深 2 mm, 其槽间距为 2 cm 或 4 cm, 如表 2 实验 1~4。实验时发现除实验 1 外, 其余三组实验都存在干点, 而实验 1 的充模速度也较慢。因此, 引流槽的槽宽和槽深可能过小, 将其分别改为 4 mm、3.5 mm, 主槽的槽宽和槽深则分别改为 5 mm、3.5 mm, 间距在不同的实验中分别设为 2 cm、4 cm 和 6 cm, 如表 2 实验 5~10。实验时流动前峰均比较均匀, 且引流槽间无干点出现。



从表 2 可看出: 引流槽槽间距为 2 cm(实验 5 和 6)时, 充模时间最短。对比表 2 中实验 5 和 6、7 和 8 及 9 和 10, 可看出沟槽型真空注射成型工艺的基本结构形式对充模时间亦有影响, 基本结构形式图 1(a)比图 1(b)的充模时间均要快。这主要是由于树脂的重力加快了浸渍。对比实验 5、6 和 7、8, 充模时间差别不大, 而引流槽间距为 4 cm 时可以减少树脂的浪费。因此, 根据小尺度实验可初步确定引流槽的优化参数为: 宽 4 mm、深 3.5 mm、槽间距为 4 cm。沟槽型真空注射成型工艺的充模过程以实验 6 为例, 如图 4 所示。

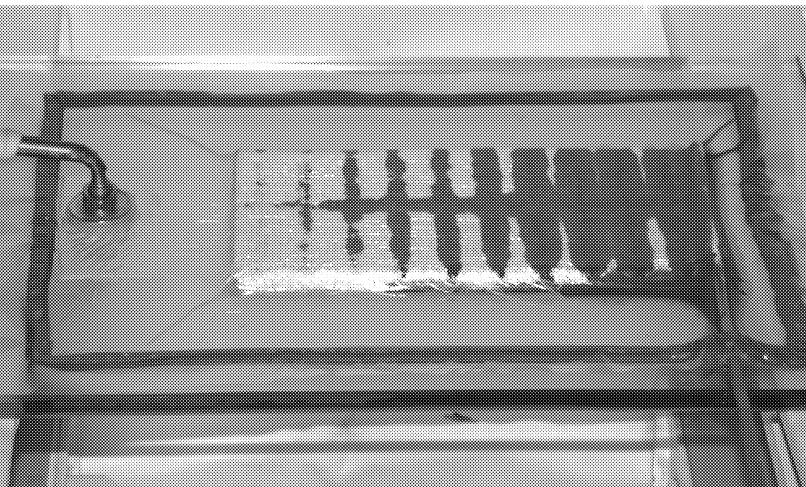


图 4 实验 6 的充模过程 (12 s)

Fig. 4 Filling process for experiment 6 (12 s)

2.1.3 主槽设计

从上面的小尺度沟槽型真空注射成型工艺实验

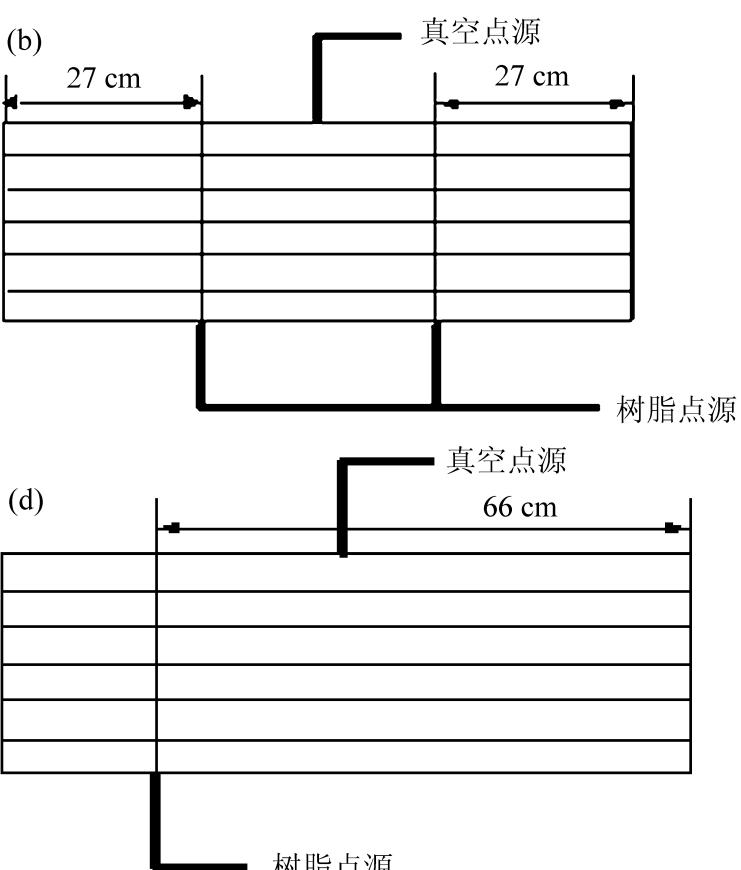


图 5 主槽槽间距设计

Fig. 5 Design for the spacing between supply grooves

可看出：主槽的宽度和深度相对而言不是很重要的参数，只要适中即可。当沟槽(包括引流槽和主槽)宽超过 6 mm 时，容易造成大量树脂的浪费，甚至会引起纤维预成型体在真空吸力作用下陷入沟槽中；而沟槽宽小于 3 mm 时不利于加工。因此，沟槽的尺寸一般为 3~6 mm。为了优化主槽的槽间距，进行了多组大尺度的沟槽型真空注射成型实验。真空袋内主要材料的尺寸为宽 34 cm、长 80 cm。引流槽(宽 4 mm、深 3.5 mm)按一定的槽间距刻在板材的长度方向，主槽(宽 5 mm、深 3.5 mm)则刻在板材的宽度方向。实验采用树脂点源和真空点源。

开始引流槽的槽间距为 4 cm，板材宽度方向的中心刻有一条主槽(如图 5(c))，如表 3 实验 1。结果在预成型体表面发现许多干点，需施加外力才能消除。因此引流槽间距为 4 cm 可能过大，将其改为 3 cm，如实验 2，结果充模质量得到明显的改善，无干点存在。因此，引流槽的优化参数可确定为宽 4 mm、深 3.5 mm、间距 3 cm。

表 3 大尺度沟槽型真空注射成型工艺实验

Table 3 Large scale experiments for vacuum infusion molding process based on grooves

实验编号	温度 / °C	预成型体		Pattern	充模时间 / s
		类型	层数		
1	35	复合毡	4	图6(c)	403
2	35	复合毡	4	图6(c)	291
3	35	缝编毡	4	图6(a)	226
4	35	缝编毡	4	图6(b)	150
5	35	缝编毡	4	图6(c)	271
6	35	缝编毡	4	图6(d)	342
7	35	复合毡	4	图7(b) 边:201 另一边:202	
8	35	复合毡	4	图7(c) 近真空边:206 远真空边:211	
9	40	缝编毡	4	图7(a)	233
10	45	缝编毡	4	图7(a)	187
11	35	缝编毡	10	图7(a)	613

注：1. 除试验1的引流槽间距为 4 cm 外，其它均为 3 cm
2. 树脂中加入 1.0 % MEKP 和 0.6 % CoNap
3. 模腔内真空抽至 0.09 MPa
4. 实验均采用基本结构方式图1(b)

主槽的槽间距设计如图 5 所示，相应实验为表 3 中的实验 3、4、5 和 6。

从表 3 可看出：主槽的设计对充模时间有明显的影响。主槽槽间的树脂只需要流动间距一半的距离，而充模时间主要取决于树脂必须流过的最长距离。图 5 中树脂必须流过的最长距离依次为 25 cm、27 cm、40 cm 和 66 cm，其相应的充模时间成递增趋势。表 3 中实验 3~6 的结果也证明了这一点。尽管减少主槽的间距可有效缩短充模时间，但过多的主槽易造成树脂的浪费和难以控制的流动前锋。因此，主槽的槽间距应控制在一定的范围内。在实验 6

中，发现有少量的干点产生，这意味着树脂流动的最长距离不宜超过 66 cm。通过对充模实验的整体观察，确定主槽的优化槽间距为 50~120 cm，具体应根据模塑件的尺寸而定。靠近板端的主槽与板端的距离不宜超过 60 cm。而且树脂需流过的最长距离和最短距离应该平衡，不宜相差过大。

2.2 工艺参数对沟槽型真空注射成型工艺充模的影响

注胶口和真空口的三种布线方式如图 6 所示。实验对温度、粘度、纤维结构和预成型体厚度等进行了讨论。实验设计和结果见表 3。充模过程以表 3 中实验 8 为例，如图 7 所示。

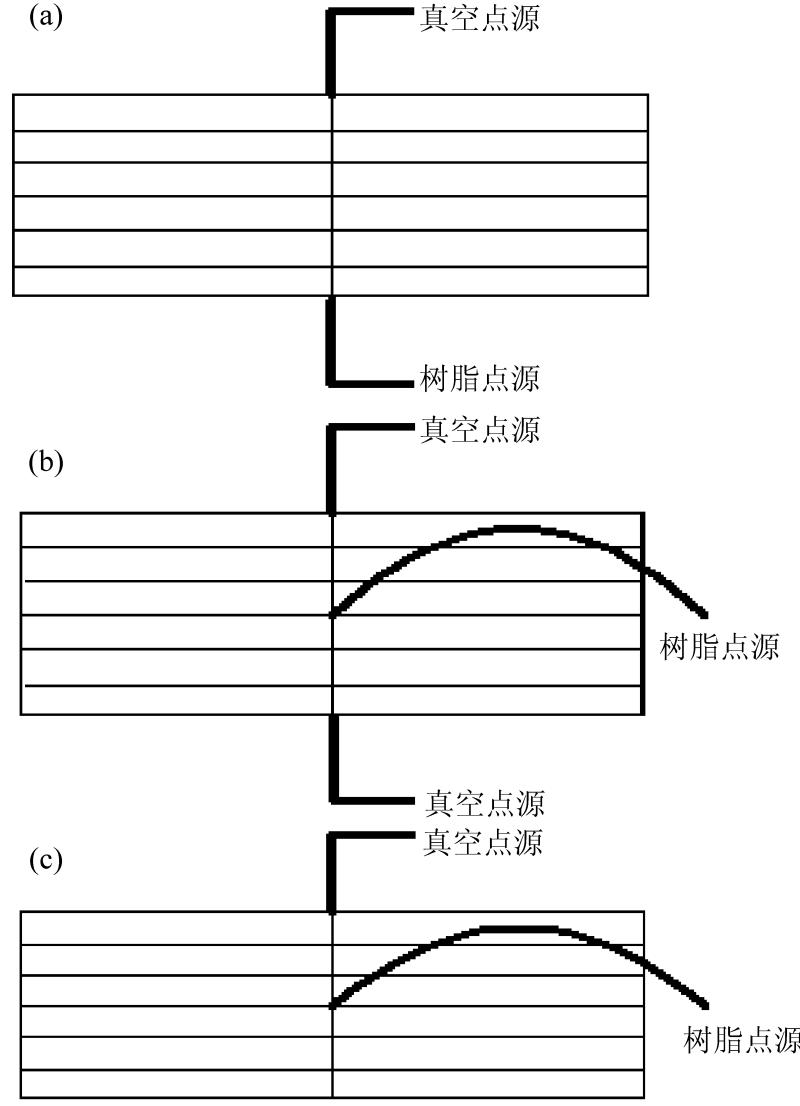


图 6 沟槽型真空注射实验注胶口和真空口的布线方式

Fig. 6 Patterns of location of injection gate and vacuum vent for vacuum infusion molding process based on grooves

从表 3 可见：最佳布线方式是图 6(b) (如实验 7)，充模速度最快，但布线方式图 6(b) 和图 6(c) 在充模时间上的差别不明显。实验 2 的充模时间(291 s)比实验 7(201 s)长 90 s，比实验 8 长 80 s(211 s)。可见树脂源和真空源的对称性在沟槽型真空注射中并不如在高渗透介质型真空注射中重要^[10]，因为板材上的沟槽为真空提供了良好的通道。但树脂源应

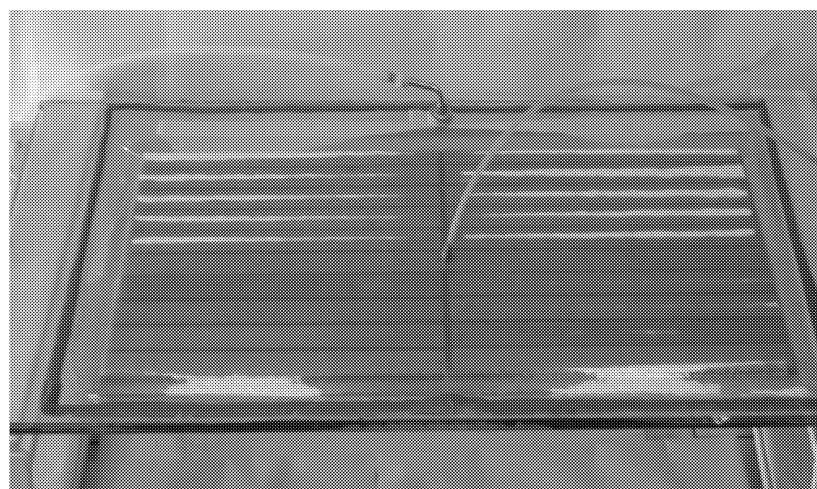
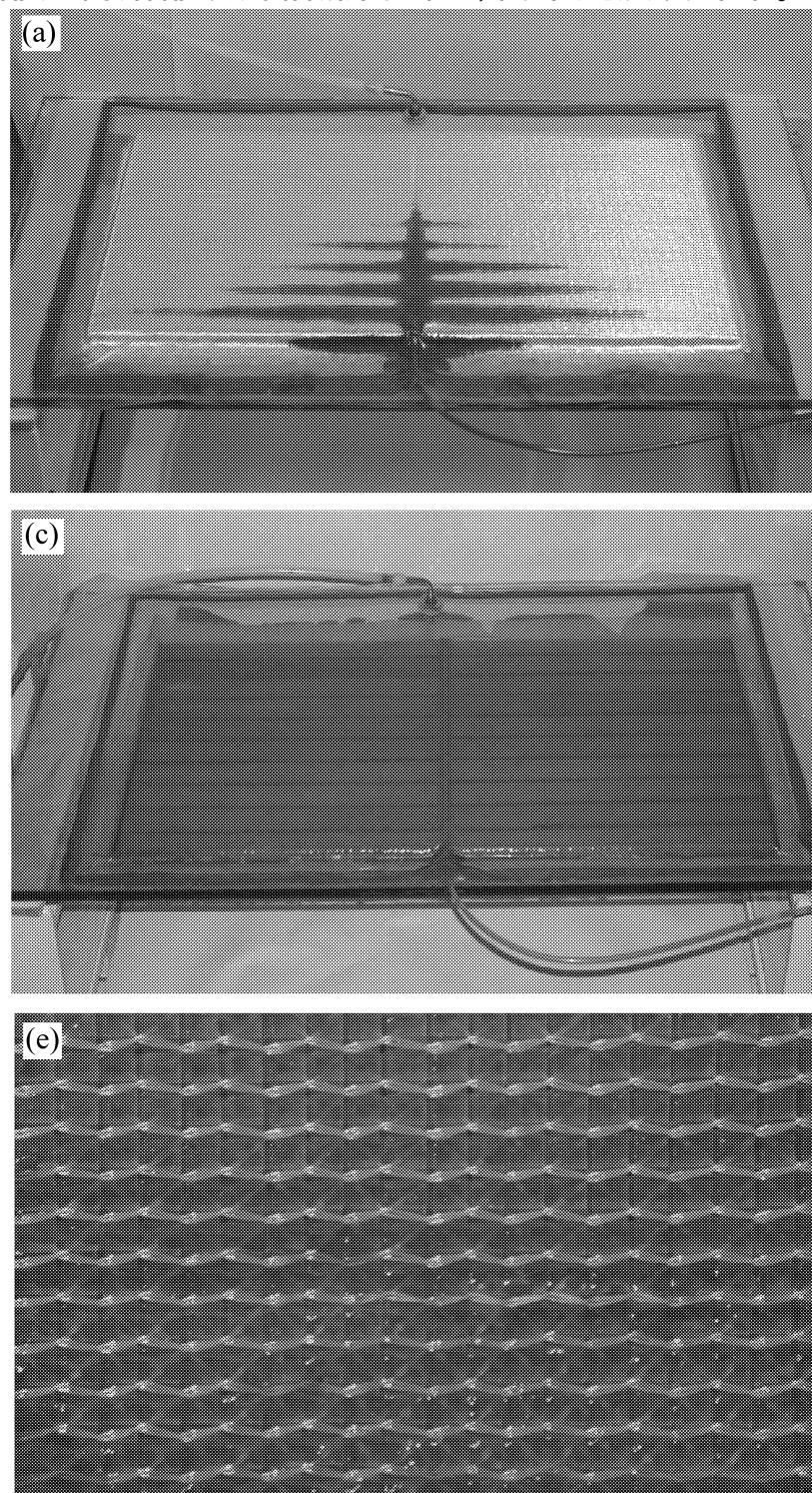


图 7 实验 8 的充模过程 (121s)

Fig. 7 Filling process for experiment 8 (121s)

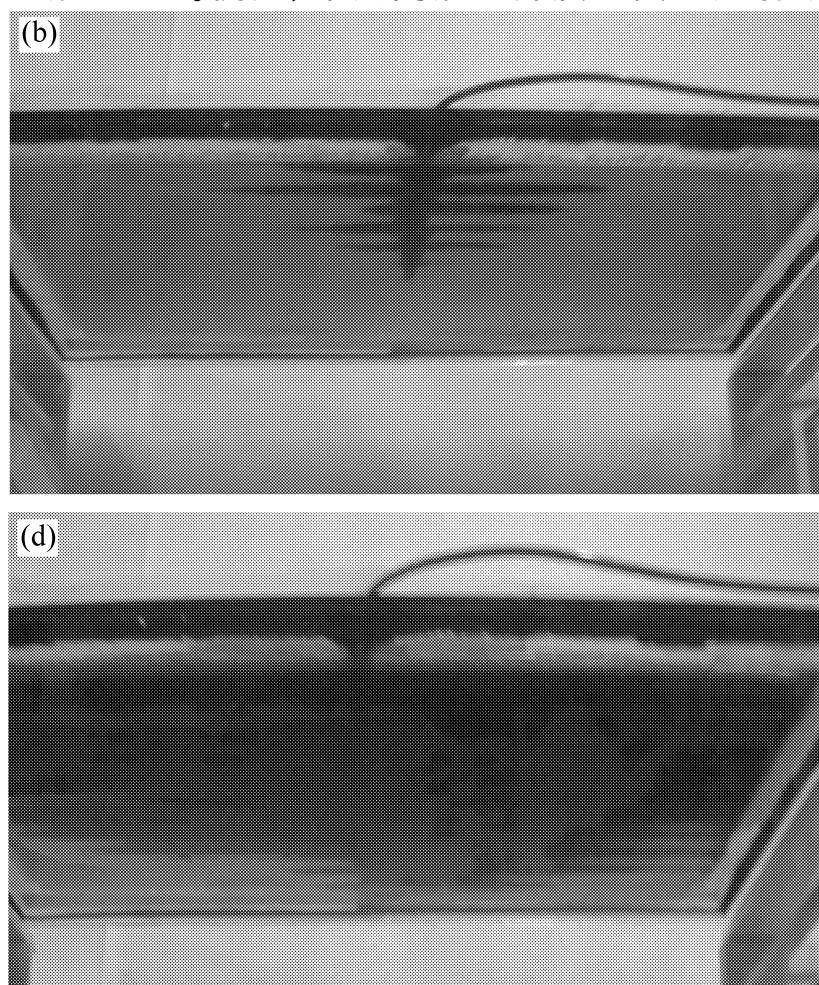
置于模腔的几何中心, 尽量缩短树脂必须流过的距离, 以提高充模速度。另外值得注意的一点是真空源与板材沟槽间的距离。真空不能直接与沟槽相连, 否则大部分树脂都从沟槽流向出口, 而不是浸渍纤维。



这主要是由于纤维预成型体与真空气口的渗透率相差太大。因此真空气口与沟槽间应有一定的距离。从实验中发现 2~4 cm 比较适合。

为了进一步获得显著的结果, 实验选用布线方式图 6(a) 对其它参数进行了讨论。对比表 3 中的实验 5、9 和 10, 35 下的充模时间(271 s)几乎是 45 下充模时间(187 s)的 1.5 倍。可见, 温度升高时树脂粘度的降低大大有利于充模速度的提高。对比实验 5 和 11, 10 层缝编毡的充模时间(613 s)远远大于相同条件下 4 层缝编毡的充模时间(271 s), 这说明预成型体的厚度即预成型体的渗透率也是影响沟槽型真空注射成型工艺充模时间的一个因素。

从大尺度沟槽型真空注射成型实验还可明显地看到, 其充模速度远远高于高渗透介质型真空注射成型工艺。例如, 采用高渗透介质型真空注射成型四



- (a) 60 s (上表面)
- (b) 60 s (下表面)
- (c) 617 s (上表面)
- (d) 617 s (下表面)
- (e) 夹芯面板的一部分

图 8 夹芯面板的基本制作过程

Fig. 8 Basic process for the manufacture of the sandwich panel

层缝编毡的充模时间(560 s)是相同条件下采用沟槽型真空注射成型充模时间(271 s)的两倍多^[10]。而前者使用树脂线源,后者使用树脂点源。

3 实例制作

采用沟槽型真空注射成型工艺制作了一块80 cm × 34 cm 的夹芯面板。面板主要由外层(复合毡)、轻质木材芯材和内层(复合毡)组成。

3.1 沟槽设计

引流槽的宽、深和槽间距分别为4 mm、3.5 mm和3 cm。主槽的宽度和深度分别为5 mm和3.5 mm。引流槽平行地刻在木板的长度方向,一条主槽则刻在木板的横向中心处。所有的沟槽均对称地刻在木板的顶部、底部、各个侧面,首尾相连,以便于芯材下面预成型体的浸渍。

3.2 供料设计

采用树脂点源和真空点源,如图8(a)所示。树脂通过直径为6 mm的塑料管来输送。为了便于充模过程的观察,选用注胶口和真空口的布线方式图6(a)。在芯材主槽上靠近树脂点源处钻一小孔(钻透板材),以加快树脂对底部的浸渍。

3.3 铺层

先在模具上打脱模蜡,再铺上四层缝编毡,并将已刻好沟槽的芯材置于其上,接着将树脂点源入口安在主槽的一端,再铺上四层缝编毡,在主槽另一端4 cm 处安好真空点源后将整个体系用真空袋密封。

3.4 注射准备

体系密封好后,关闭树脂入口抽真空查漏。先将真空抽至0.09 MPa,再关闭真空保持5 min,若压力迅速下降,则应重新仔细检查漏气处,直至不漏气为止。

在35℃下预热1200 g 不饱和树脂,并加入1.0% MEKP 和0.4% CoNap 搅拌均匀,准备充模。

3.5 注射

打开点真空源和树脂入口,充模迅速开始,树脂均匀地沿着主槽流动并向引流槽分流。开始上、下表面的流动外形非常接近,如图8(a)和图8(b)。3 min后,上、下表面流动形状出现了明显的差距,上表面在617 s时充满,而下表面则在661 s时才浸渍完,如图8(c)和图8(d)。充模结束后,关闭点真空源,保持袋内真空直到树脂凝胶、固化。面板脱模后,经检查其浸渍非常均匀,目测无任何干点,如图8(e)所示。夹芯面板一次注射成型成功,基本成型过程如

图8所示。

4 结 论

(1) 沟槽型真空注射成型工艺的充模速度远远高于高渗透介质型真空注射成型工艺。

(2) 根据充模实验测试,引流槽的优化参数可确定为宽4 mm、深3.5 mm、间距3 cm。

(3) 通过充模实验测试及实验观察,主槽的优化槽间距为50~120 cm,主要应根据模塑件的尺寸而定。靠近板端的主槽与板端的距离不宜超过60 cm。而且树脂需流过的最长距离和最短距离应该平衡,不宜相差过大。

(4) 要获得较快且均匀的充模,树脂源应布置在模腔的几何中心,尽量缩短树脂的流动距离,以提高充模速度;但树脂源和真空源的对称性在沟槽型真空注射中并不如在高渗透介质型真空注射中重要,因为板材上的沟槽为真空提供了良好的通道;实验中发现真空源与板材沟槽间的距离为2~4 cm较为适合。

参考文献:

- [1] Kosmatka, John B, Hornbeck, et al. Overview of the development of the ARPA/BIR composite assault bridge [J]. International SAMPE Technical Conference, 1996, 28(4-en, 8): 1228-1239.
- [2] Pike T, McArthur M, Schade D. Vacuum assisted resin transfer molding of a layered structural laminate for application on ground combat vehicles [J]. International SAMPE Technical Conference, 1996, 28(4-7): 374-380.
- [3] Lewit, Scott M, Jakubowski, et al. Low cost VARTM process for commercial and military applications [J]. International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings), 1997, 42(2): 1173-1187.
- [4] Andersson M, Lundstrom S, Gebart B R, et al. Development of guidelines for the vacuum infusion process [A]. In: Proceedings of FRP [C]. 2000.
- [5] 邓京兰, 祝颖丹, 王继辉. SCRIMP 成型工艺的研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2001, 5: 40-43.
- [6] Rigas E J, Wanlsh S M, William A S. Development of a novel processing technique for vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) [A]. In: SAMPLE [C]. 2001. 1086.
- [7] Hammami A, Gebart B R. Experimental investigation of the vacuum infusion process [A]. In: Proceedings of ECCM-8 [C]. 1998.
- [8] Lacy G E, Eng P, Gall B B. Fabrication of a large FRP deck with longitudinal and transverse stiffeners in a single infusion [J]. Composites, 2000, 27-30: 141-149.
- [9] Hoebergen A, Van H E, Labordus M. Practical injection strategies using vacuum injection techniques for boat building [A]. In: IWOMS 99: Third International Workshop on Materials Science, Part — Trends in Materials Science and Technology [C]. 1999. 721-726.
- [10] 祝颖丹, 李新华, 王继辉, 等. 高渗透介质型真空注射成型工艺的研究, 复合材料学报, 2003, 20(4): 136-140.