

含阻尼层夹芯复合材料充模工艺与仿真

孙士勇 张润东 王新玲 杨睿

Mold filling process and simulation of sandwich composites with damping layer

SUN Shiyong, ZHANG Rundong, WANG Xinling, YANG Rui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221102.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

缝合夹层结构复合材料树脂传递模塑成型工艺充模仿真

Filling simulation of stitched sandwich composite by resin transfer molding process

复合材料学报. 2018, 35(12): 3342–3349 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180207.004>

基于孔隙控制的车身结构树脂传递模塑成型工艺设计

Design of resin transfer molding process for vehicle body structure based on porosity control

复合材料学报. 2017, 34(5): 970–977 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161010.001>

基于混合网格方法的VARTM工艺充模仿真与实验验证

Simulation and experimental validation for the mold-filling process of VARTM based on mixed grid approach

复合材料学报. 2017, 34(8): 1736–1744 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161115.008>

复合材料带筋壁板预成型体压缩性与渗透性对树脂流动的影响

Effect of compaction and permeability of the composite stiffened panel preform on resin flow

复合材料学报. 2019, 36(4): 811–825 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180419.001>

碳纤维复合材料超声振动辅助RTM工艺的浸润特性

Impregnation characteristics of carbon fiber composite during ultrasonic vibration assisted RTM process

复合材料学报. 2021, 38(12): 4161–4171 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210302.007>

基于分层理论的螺栓连接夹芯复合材料加筋结构振动特性

Vibration characteristics of reinforced sandwich composite structure with bolt connection based on layer-wise theory

复合材料学报. 2019, 36(12): 2815–2821 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190111.001>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

含阻尼层夹芯复合材料充模工艺与仿真

孙士勇, 张润东, 王新玲, 杨睿*

(大连理工大学 机械工程学院, 大连 116024)



分享本文

摘要: 在复合材料中引入黏弹性阻尼层是改善复合材料结构振动特性的有效方法。针对穿孔硅橡胶夹芯复合材料的真空辅助树脂传递工艺 (VARTM) 进行了实验与仿真分析。首先采用恒压注射条件分别测试了纤维增强材料及加入导流网后的等效渗透率。然后搭建了实验室 VARTM 观测平台进行了充模实验, 同时基于 RTM-Worx 软件建立了树脂充模模型。通过对比实验与仿真的树脂流动状态图及不同时刻的填充面积, 验证了仿真模型的有效性。最后, 探究了阻尼层穿孔列间距、行距、直径及“边缘效应”等参数对树脂充模的时间及充模过程的影响。结果表明: 仿真模型能够较好预测树脂流动情况, 不合理的阻尼层参数会影响树脂的流动甚至导致缺陷的产生。

关键词: 真空辅助树脂传递模塑; 夹芯复合材料; 充模过程; 渗透率; 边缘效应

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)08-4471-10

Mold filling process and simulation of sandwich composites with damping layer

SUN Shiyong, ZHANG Rundong, WANG Xinling, YANG Rui*

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Introducing viscoelastic damping layer into composites is an effective method to improve the composite structural vibration characteristics. The vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process of sandwich composites with perforated silicone rubber was investigated by experiment and simulation. Firstly, the equivalent permeability of fiber reinforced materials and its combination with the flow medium were tested under constant pressure injection conditions. Then, the VARTM platform was set up to observe mold filling experiment in the laboratory. The resin filling model was established based on the RTM-Worx software. The validity of the simulation model was verified by comparing the experimental resin flow diagram and the filling area with simulated results at different time. Finally, the effects of the parameters such as the spacing between columns, the row spacing, the diameter of the holes in the damping layer and the "edge effect" on the resin filling time and the filling process were discussed. The results show that the simulation model can better predict the resin flow behavior, and unreasonable parameters of damping layer can affect the resin flow and even lead to defects.

Keywords: vacuum assisted resin transfer molding; sandwich composites; filling process; permeability; edge effects

纤维增强复合材料由于其高比强度、高比刚度等特点已经发展为风电叶片的重要材料^[1]。随着叶片长度增加、柔性增大, 由此引发的结构振动问题不可忽视^[2]。通过在复合材料中引入黏弹性阻尼层是改善结构振动特性的有效方法^[3-4]。含阻尼层夹芯复合材料由上、下层纤维面板和中间

阻尼层组成, 通过真空辅助树脂传递工艺 (Vacuum assisted resin transfer molding, VARTM) 制成。由于黏弹性阻尼层一般为疏水性材料阻碍了树脂流动容易导致缺陷产生, 因此分析树脂在夹芯材料中的复杂流动行为十分重要。

目前广泛采用控制体积法 (CV/FEM) 模拟树脂

收稿日期: 2022-08-31; 修回日期: 2022-10-07; 录用日期: 2022-10-20; 网络首发时间: 2022-11-02 17:08:09

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221102.001>

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB1506704-02); 国家自然科学基金 (51975085); 中央高校基本科研业务费专项基金 (DUT21GF405)

National Key Technology R&D Program of China (2020YFB1506704-02); National Natural Science Foundation of China (51975085); Fundamental Research Funds for the Central Universities (DUT21GF405)

通信作者: 杨睿, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高性能复合材料结构设计与制造 E-mail: yangrui@dlut.edu.cn

引用格式: 孙士勇, 张润东, 王新玲, 等. 含阻尼层夹芯复合材料充模工艺与仿真 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(8): 4471-4480.

SUN Shiyong, ZHANG Rundong, WANG Xinling, et al. Mold filling process and simulation of sandwich composites with damping layer[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(8): 4471-4480(in Chinese).

流动过程^[5]。Yoon 等^[6]与 Yang 等^[7]分别提出了同质建模法和考虑预制体压缩行为的树脂流动方程。Shevtsova 等^[8]则充分考虑了热、动力学和流变效应,为分析复杂几何形状的树脂前沿提供了更好的方法。赖家美等^[9]、李彩林等^[10]、叶乔丹等^[11]针对 VARTM 成型过程中的导流介质、注胶方式、铺层、流道设计等工艺参数,研究了不同方案对注射时间和流动前沿的影响。以上研究普遍把预制体看作均一多孔介质,采用达西定律模拟树脂的渗流行为^[12]。

复杂的预制体结构可能导致树脂流动的局部异常,从而产生局部干斑等缺陷。詹东等^[13]改变预制体局部纤维体积密度,证明了局部高纤维密度可能会导致包络现象影响填充质量。Magagnato 等^[14]和 Lawrence 等^[15]提出了嵌入件加入增加了产生干斑的风险。Bertling 等^[16]分析了干斑的形成和分散机制,并提出干斑的分散速度与树脂黏度、压力梯度等有关。Arbter 等^[17]指出早期干斑点会发展成许多小空隙。

工业上通常对夹芯层穿孔或引入沟槽来保证树脂充分浸润纤维增强材料,因而夹芯材料充模过程中的树脂流动行为也更复杂。金世奇等^[18]、王科等^[19]采用 ESI 集团的 PAM-RTM 软件仿真分析了缝合参数对缝合夹层复合材料充模工艺的影响。Jishi 等^[20]采用光学观察的方法研究了缝纫泡沫夹芯材料中树脂流动行为。Yan 等^[21]研究了泡沫芯开孔和开槽两种处理方式对树脂流动压力、流动前沿和填充时间等方面差异。Jhan 等^[22-23]定义了夹层组件内部的 4 个树脂饱和阶段并通过 RTM-Worx 软件分析了夹芯结构中的“跑道跟踪”现象。

目前对开槽处理的泡沫夹芯结构的充模过程的树脂前沿研究较多,而少有对夹芯层穿孔复合材料充模工艺的探究,且相关文献中往往忽略了“边缘效应”影响。本文以薄层穿孔橡胶夹芯复合材料为研究对象,首先完成了材料等效渗透率的测量。然后建立了真空辅助树脂传递工艺(VARTM)的仿真模型,并通过与充模实验不同时刻填充面积对比验证了模型的正确性。进一步模拟探究了阻尼层穿孔间距、直径与“边缘效应”等参数对充模时间与树脂流动过程的影响,为含阻尼层复合材料的制造工艺提供了分析方法。

1 理论及实验方法

1.1 渗透率的计算

在 VARTM 成型中,假设树脂为不可压缩的牛

顿流体,且忽略树脂的惯性力、表面张力和毛细力,树脂的流动可以用下面改进的 Darcy 定律表示。

$$Q = K \frac{A \Delta P}{\mu L} \quad (1)$$

其中: Q 为通过试样截面积的体积流量; A 为横截面积; μ 为黏度; K 为增强材料渗透率张量; ΔP 为压强差; L 为流体流过长度。

对式(1)加以变换, $v = \frac{Q}{A\varphi}$ 可以得到下式:

$$v = \frac{dL}{dt} = \frac{K \Delta P}{\mu \varphi L} \quad (2)$$

其中: φ 为孔隙率; v 为表面流动速度。

进行渗透率测量时,通常设定恒定压力的情况。其计算方法是假设压差 ΔP 是固定值,在时间 $t=0$ 、 $L=0$ 的初始条件下,对式(2)中 t 进行积分得到:

$$L^2(t) = \frac{2K \Delta P}{\mu \varphi} t \quad (3)$$

通过对 $L^2(t)$ 与 t 线性拟合,求出直线斜率即可得到渗透率。

基于流体力学表征孔洞渗透率,阻尼层中树脂管道是沿管道方向的一维流动,树脂在小孔洞中的流动可视为层流,故树脂的流动可用修正的 Hagen-Poiseuille^[24] 方程来描述:

$$Q = -\frac{\pi(r-r_0)^4}{8\mu} \frac{dP}{dL} \quad (4)$$

其中: r 为管道半径; r_0 为边界层厚度; P 为压强,同时结合 Darcy 定律分析树脂在孔洞的流动,得到树脂流道渗透率为

$$K_r = \frac{\pi(r-r_0)^4}{8r^2} \quad (5)$$

式中:假设管道的边界层厚度为 $r_0=0.2 \text{ mm}$ ^[25],孔洞半径 $r=1 \text{ mm}$,计算得到 $K_r=5.12 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ 。

1.2 材料参数的测量

原材料:玻璃纤维平纹布(型号 EW200,单层厚度 0.2 mm ,面密度为 200 g/m^2 ,南京玻璃纤维研究院);树脂基体:环氧树脂 EPOLAM 2040 和固化剂 EPOLAM 2042(质量比 $100:32$ 混合后 25°C 黏度 $\mu=0.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), 葛科颂化工产品有限公司;硅橡胶阻尼层尺寸 $180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ (江苏朗力得新材料有限公司);真空泵(2XZ-4,浙江扬子江泵业有限公司);辅助材料和设备包括真空袋、导流网、脱模布、树脂管、螺旋管、密封胶带、压力桶、平板模具等。

含阻尼层预制体的铺层结构如图 1 所示:树

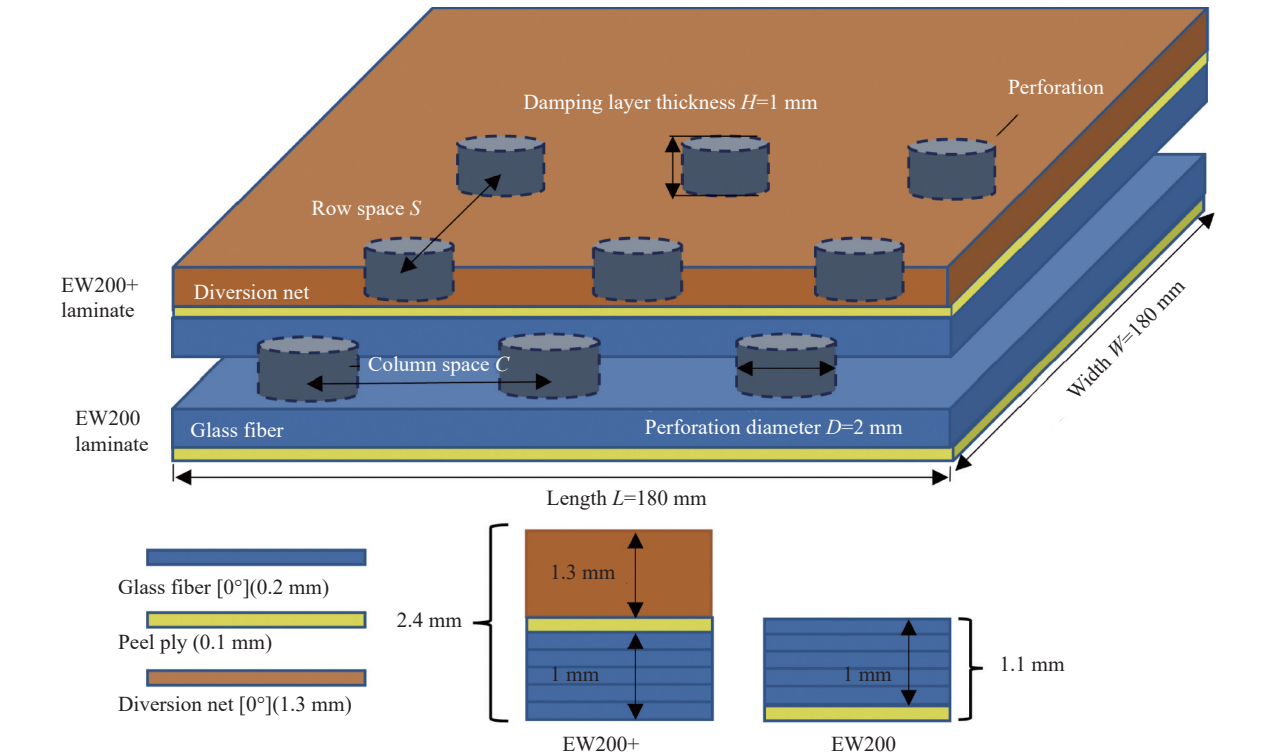


图1 含阻尼层预制品模型图

Fig. 1 Model diagram of preform with damping layer

脂由左向右流经预制品，上层记作 EW200+铺层 (1 层导流网、1 层脱模布与 5 层玻璃纤维布构成)；下层记作 EW200 铺层 (5 层玻璃纤维布与 1 层脱模布构成)；中间层是穿孔阻尼层 (图中只显示树脂流经的孔洞)，实验设置穿孔列间距 $C=15\text{ mm}$ ，行间距 $S=45\text{ mm}$ ，直径 $D=2\text{ mm}$ ，阻尼材料厚度 $H=1\text{ mm}$ 。

实验室根据 GB/T 1463—2005^[26] 分别测得 EW200 铺层与 EW200+铺层对应纤维增强材料的平均面密度 ρ_f ，再分别代入下式计算铺层的等效孔隙率 φ ，结果见表 1。

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_a n + \rho_b m + \rho_\gamma l}{\rho_f H} \times 100\%$$

(6)

其中： ρ_a 、 ρ_b 、 ρ_γ 分别为纤维布、导流网、脱模布面密度； n 、 m 、 l 为铺层中纤维布、导流网、脱模布层厚度； H 为增强材料的总厚度。

表 1 材料参数测试结果

Table 1 Test results of material parameters

Laminate type	Equivalent porosity/%	Average permeability/ (10^{-11} m^2)	
		Length wise K_x	Width wise K_y
EW200	57.4	2.78	2.67
EW200+	60.0	115	83

实验室搭建了 VARTM 实验平台 (图 2) 采用一维恒压渗透率测试实验^[9]：用摄像机记录纤维布中树脂前沿的流动位置，分别代入式 (3) 计算单一方向的等效渗透率。待测铺层每个方向测量 3 次，将长度和宽度方向的等效渗透率结果 K_x 和 K_y 取平均值 (表 1)，作为后续仿真的输入参数。

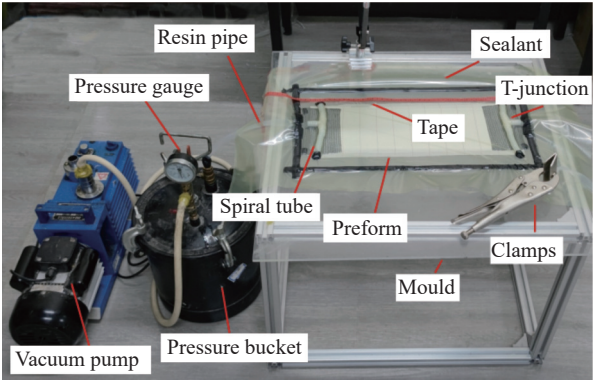


图 2 真空辅助树脂传递工艺 (VARTM) 成型实验平台

Fig. 2 Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process experiment platform

1.3 含阻尼层复合材料充模实验

试件的总尺寸为 $180\text{ mm}\times180\text{ mm}\times4.5\text{ mm}$ ，上下两层各包括 5 层 EW200 纤维织物，铺层状态

与图 1 一致。预制体上下层各加一层 0.1 mm 厚的脱模布。实验布置如图 2 所示，抽真空检查气密性后进行实验，左端真空泵实现负压 $p=-0.09\text{ MPa}$ 将树脂从右侧吸入。用摄像机记录上、下层合板树脂填充的完整过程，之后采用 Matlab 对实时图像进行处理，分析不同时刻树脂的流动前沿位置及填充面积占比。

1.4 充模仿真模型

树脂在含阻尼层夹芯复合材料的实际流动区域包括上下层合板与阻尼层孔洞，本文基于有限元软件 RTM-Worx 模拟树脂填充流动过程，整个模型尺寸为 $180\text{ mm}\times180\text{ mm}\times4.5\text{ mm}$ 。模型自上而下共包括 3 层：上层是 1 层导流网、1 层脱模布和 5 层纤维布的等效整体，总厚度 2.4 mm；下层是 5 层纤维布与 1 层脱模布的等效整体厚度为 1.1 mm；中间是 1 mm 厚的穿孔阻尼层，孔洞用竖直流道模拟。

整个模型采用恒压注射，注胶口压力值为 0，

出胶口压力 -0.09 MPa ，树脂黏度 $\mu=0.5\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。为了简化模型，按照表 1 设置上下铺层的等效渗透率与孔隙率。注意到实验过程中侧边会出现边缘效应：树脂优先从两侧缝隙中流过，从而导致不良流动前沿如图 3 所示。在边缘处建立小平面来模拟边缘的侧流，经过后文实验与仿真对比，侧平面的渗透率为 $5\times10^{-12}\text{ m}^2$ 时结果最相近。将模型划分为边长 2 mm 左右的四面体网格，仿真模型如图 4 所示。

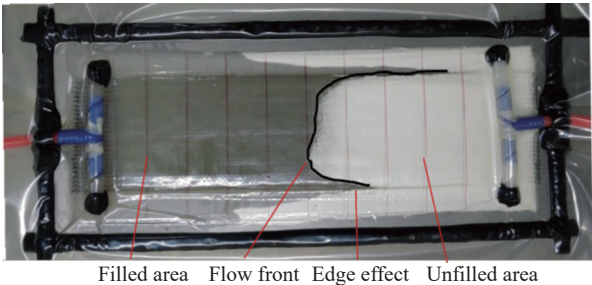


图 3 充模中边缘效应图

Fig. 3 Edge effect diagram in mold filling

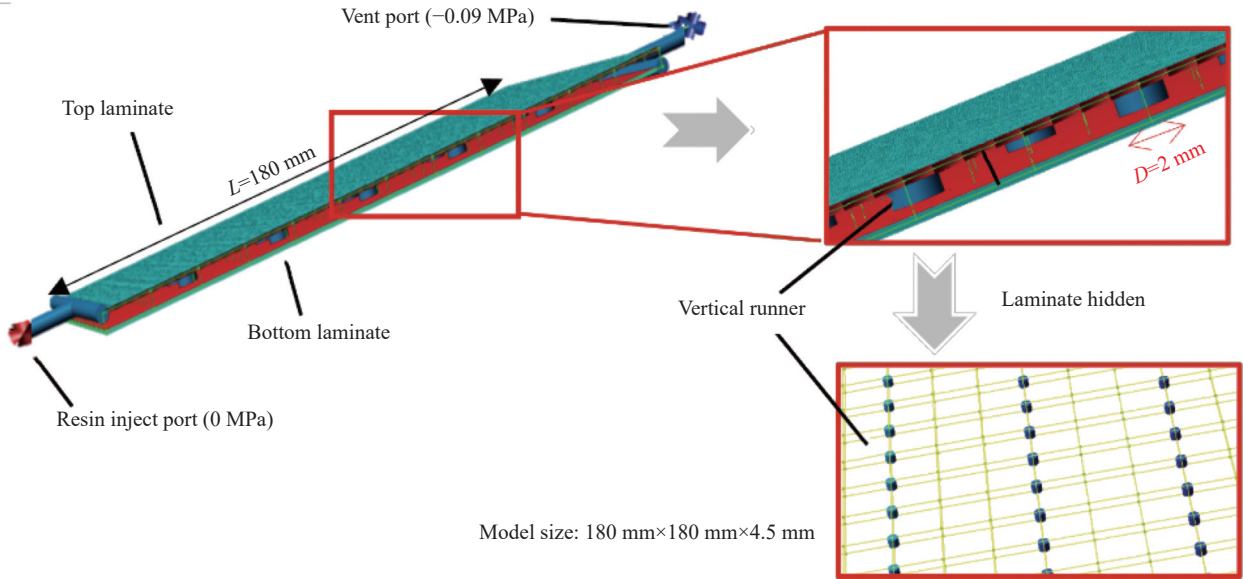


图 4 含阻尼层夹芯复合材料的充模模型

Fig. 4 Filling model of sandwich composites with damping layer

2 结果与讨论

2.1 树脂充模流动行为

图 5 为预成型体上、下两层合板中树脂流动图，截取了 2 个典型时刻对含阻尼层夹芯复合材料的充填过程进行分析。其中，黄色线表示导流网中树脂流动前沿，红色线为纤维布中树脂流动前沿，上层中树脂线性扩展，然后树脂通过阻尼层的孔洞填充下层纤维增强材料，再沿着孔洞向

四周流动填充，因此阻尼层的孔洞分布对下层合板的树脂流动影响巨大。随着上层树脂透过孔洞，从各阻尼孔洞流出的树脂流动前沿会出现干涉交汇形成包络区域，如图 5(b) 所示。

图 6 是树脂充模过程的树脂填充剖面示意图。树脂在含阻尼层夹芯复合材料充模过程的流动表现为树脂沿平面方向线性扩展快速充满整个导流网，同时导流网面内的树脂沿厚度方向渗透填充

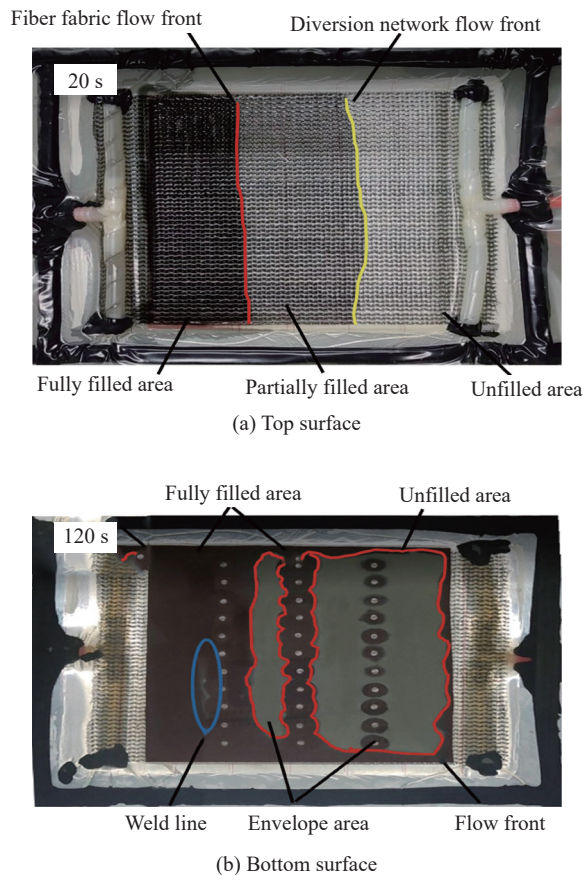


图5 含阻尼层夹芯复合材料上下表面树脂流动图

Fig. 5 Resin flow diagram of sandwich composites with damping layer at top and bottom surfaces

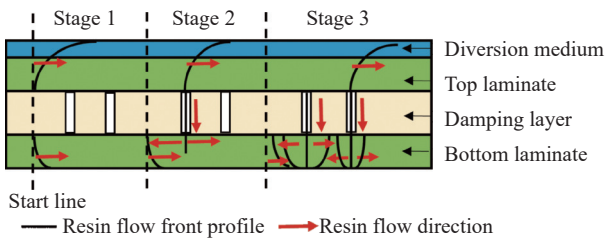


图6 含阻尼层夹芯复合材料树脂填充剖面示意图

Fig. 6 Section diagram of sandwich composites with damping layer filled by resin

上层合板，接着树脂浸透穿过阻尼孔洞，然后沿着孔洞向四周填充扩展，下层合板的流动前沿呈现一定的锯齿状。树脂填充过程可分成3个树脂填充阶段：树脂线性扩展填充导流介质及上层合板、树脂填充并穿透阻尼层孔洞、树脂在下层合板中以孔洞为中心向四周扩散。

2.2 仿真与实验对比

图5(b) 中所示下层的树脂流动情况更加复杂，树脂流动前沿位置已经不能完全表示夹芯复合材料中树脂的流动状况。通过 Matlab 图像处理模块

分别计算仿真与实验不同时刻的已填充面积占比，得到上下层合板填充面积随时间的变化如图7所示。可以看到上下层合板的实验和仿真填充面积变化趋势基本一致，但也存在一定的差异：实验和仿真中上层合板完成填充的时间分别为65 s和79.4 s、下层合板的填充时间分别为290 s和260 s。上、下层板最终填充完成时间相对误差为18.1%与11.5%，上下层合板实验填充时间相差4倍左右。其中，上层板填充过程近似线性，且在填充面积达到50%之后，实验填充速率大于仿真结果。下层合板填充面积达到90%之后，填充速率急剧降低。

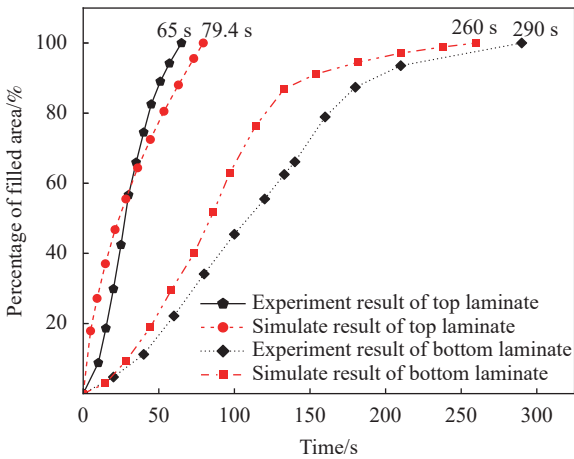


图7 含阻尼层夹芯复合材料填充过程的实验与仿真对比

Fig. 7 Experimental and simulation comparison of filling process of sandwich composites with damping layer

分别选取第50 s、100 s时刻实验与仿真模型填充情况对比如图8所示。图8(c) 中从红色到蓝色分别代表树脂填充的先后时间，红色对应流动前沿的位置，为了便于对比观察，本文所有仿真结果将下层合板旋转至最上层。可以看出，仿真和实验的树脂流动形式基本相同，上层合板树脂流动前沿成线性向前扩展，树脂通过孔洞后在下层向外扩展。

仿真与实验差别的主要原因是：(1) 仿真将导流网、脱模布和纤维增强材料看作整体的等效渗透率，与真实值略有差异；(2) 仿真模型假设压强差恒定不变，实验起始真空度达不到要求，压强差缓慢上升，因此实验初始阶段填充较慢；(3) 实验中边缘效应导致流动前沿形成包络区域，包络区域内外压强差缩小填充变慢。

综合实验和仿真充模具体时刻的树脂流动状态及填充面积对比曲线图可知，仿真与实验结果

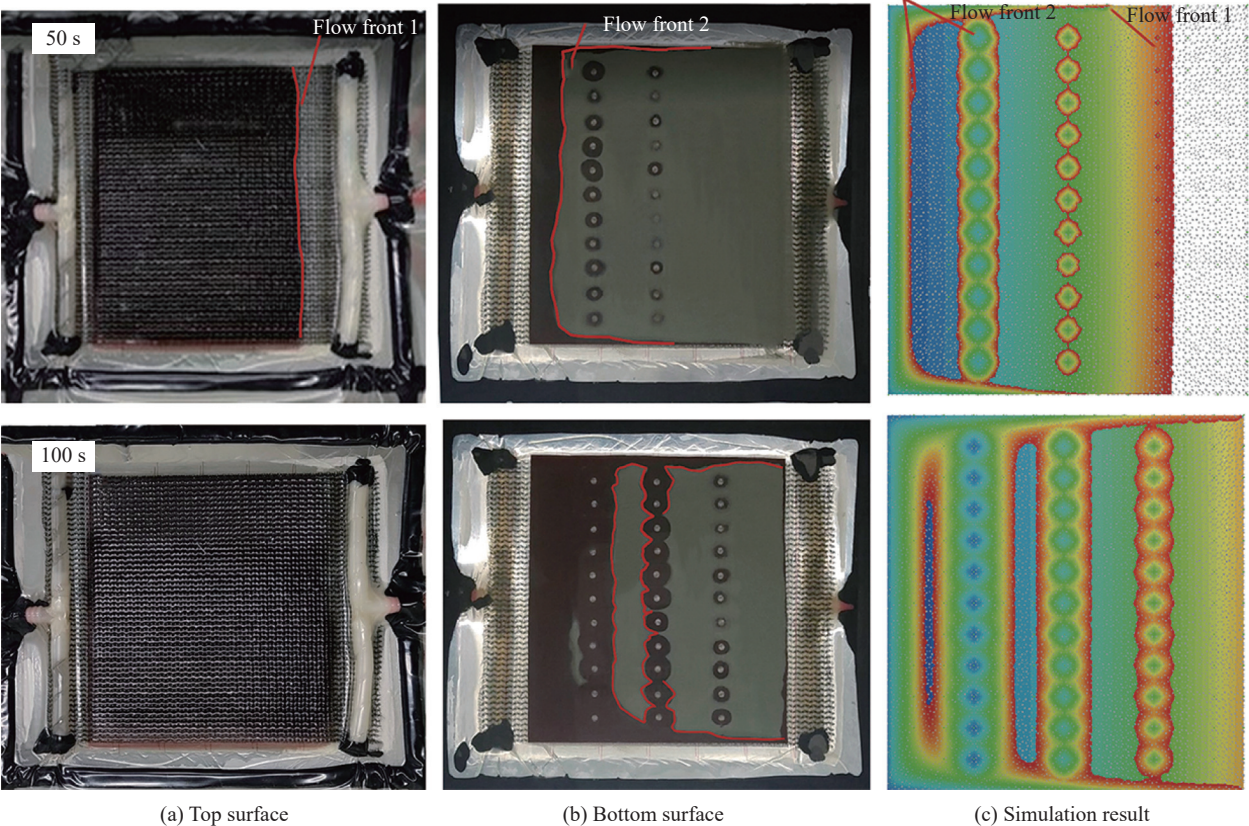


图 8 含阻尼层夹芯复合材料实验和仿真树脂填充状态对比

Fig. 8 Comparison of experimental and simulated resin filling state of sandwich composites with damping layer

的变化趋势具有较好一致性，说明该仿真模型可以用来模拟含阻尼层夹芯复合材料 VARTM 成型的树脂充模过程，减少进行实验的时间和成本。

2.3 阻尼层开孔参数对充模过程影响分析

为研究阻尼层穿孔参数对含阻尼层夹芯复合材料 VARTM 成型树脂充模的影响，提高充模效率同时避免缺陷的产生。为了使仿真结果更明显图 4 中仿真模型尺寸扩大为 360 mm×360 mm×4.5 mm 同时保持其他条件相同。

2.3.1 穿孔间距对充模的影响

选择孔直径 $D=2\text{ mm}$ 、列间距 $C=15\text{ mm}$ 、行间距 $S=15\text{ mm}$ 作为对照组。采用控制变量法分别只改变列间距与行间距，探究充模时间与树脂流动情况的变化如图 9 所示。表 2 列出为不同穿孔间距下实时流动图 (截取填充量 50% 时刻)，改变行间距与列间距上层合板树脂的流动前沿都呈线性扩展。

相比之下，下层板的填充情况更加复杂。行间距 S 增加导致下层合板中从前后两行孔洞中流下来的树脂交汇干涉，树脂流动前沿易形成包络

区域，容易产生成型缺陷。列间距 C 增大时下层合板中树脂流动前沿保持锯齿状，从每行孔洞流到下层合板中的树脂逐渐减少，导致下层合板树脂流动的同步性逐渐变差，最大的锯齿状深度由 30 mm 增加至 150 mm。

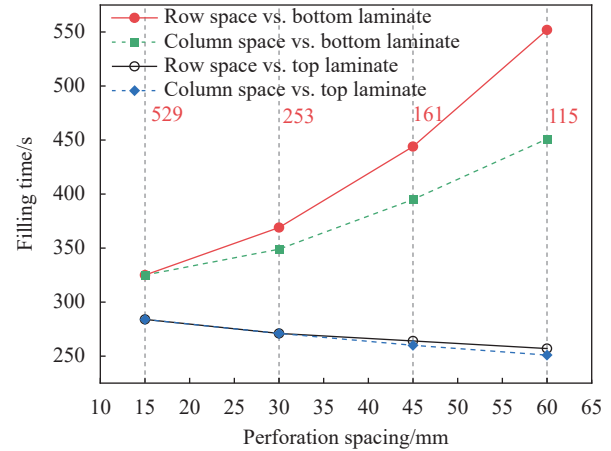
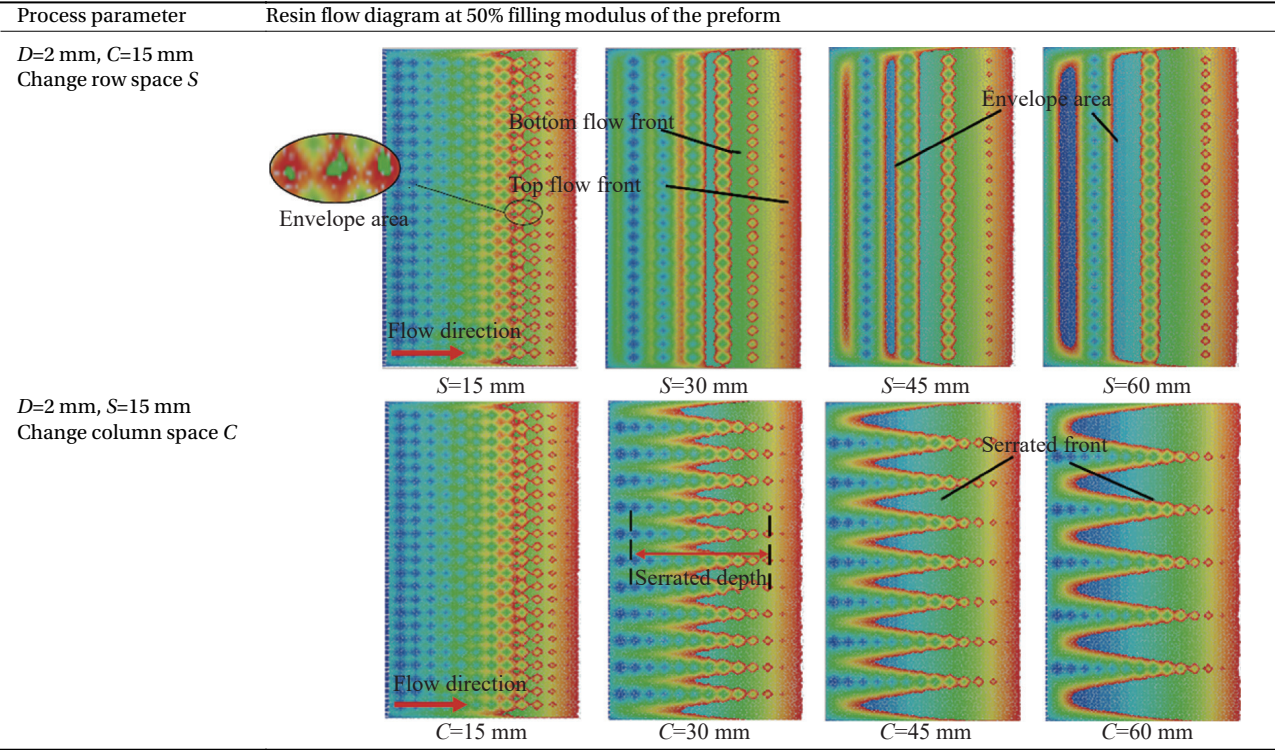


图 9 阻尼层穿孔间距对含阻尼层夹芯复合材料 VARTM 成型充模时间的影响

Fig. 9 Effects of damping layer perforation spacing on filling time of VARTM sandwich composites with damping layer

表 2 阻尼层穿孔间距对含阻尼层夹芯复合材料 VARTM 成型树脂流动的影响

Table 2 Effects of damping layer perforation spacing on resin flow in VARTM sandwich composites with damping layer



综合树脂填充时间与流动情况，增加穿孔间距都会使上下层树脂同步性变差甚至导致缺陷产生，尤其对下层合板的影响更明显。实际生产选择较小的穿孔间距。

2.3.2 穿孔直径对充模的影响

为了研究穿孔直径对于夹芯结构充模过程的影响，保持 $S=2\text{ mm}$ 、 $C=15\text{ mm}$ 不变，改变孔的直径得到上下层完成填充的时间，如图 10 所示。根据式 (5) 计算得到不同直径穿孔对应的渗透率如表 3 所示。可以发现在直径小于 1 mm 时，下层填充所需要的时间迅速增加，主要原因是直径过小，边界层效应影响了孔洞中树脂流入下层合板。而孔洞直径超过 1 mm 后，随着穿孔直径的增加，上、下层板填充时间均增加。这是由于随着穿孔直径增大，填充完成圆柱孔中的树脂体积增加，因此填充时间也略微增加。

穿孔直径为 0.5 mm 、 2 mm 与 8 mm 时的树脂模拟流动对比如图 11 所示。可以发现，穿孔直径的大小直接影响了流过的树脂量，直径增大导致上层树脂穿过孔流入下层合板的时间增多，树脂流入上层减小、下层增多，上下层流动前沿之间的距离变短，流动同步性变好。

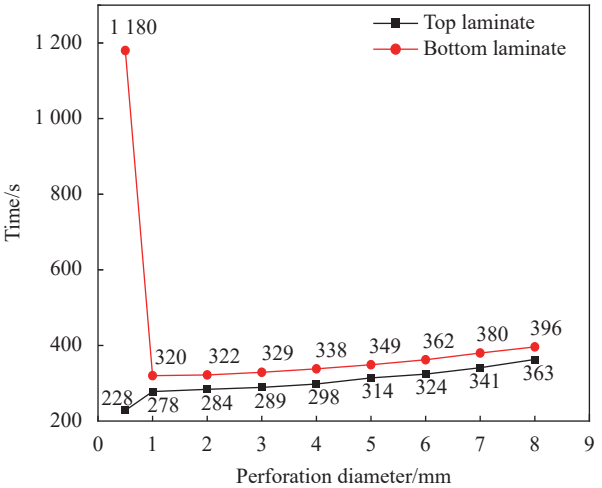


图 10 不同穿孔直径下的含阻尼层夹芯复合材料 VARTM 成型填充时间
Fig. 10 VARTM filling time of sandwich composites with damping layer under different perforation diameters

2.3.3 边缘效应对充模的影响

1.3 节试验中观察到了边缘效应，边缘效应是由于预制体与型腔之间一些间隙区域为树脂提供了优先路径，使树脂在这些区域比其他正常孔隙区域有更快的流动速度，并且间隙越大边缘效应越强。为了探究边缘效应对充模的影响。保持间距 $C=30\text{ mm}$ 、行距 $S=30\text{ mm}$ 、直径 $D=30\text{ mm}$ 不变，

表 3 不同穿孔直径对应的含阻尼层夹芯复合材料 VARTM 成型孔洞渗透率
Table 3 Permeability of VARTM sandwich composites with damping layer in different perforation diameters

Diameter/mm	Porosity/mm ²
0.5	3.927×10^{-5}
1	0.0127
2	0.161
3	0.498
4	1.031
5	1.758
6	2.682
7	3.802
8	5.118

改变侧面的渗透率，得到填充时间的结果如图 12 所示。可以看到，上层合板的填充时间随着边缘

效应增强而减小，原因是边缘处树脂流动加快，提高了填充速率。下层合板的相对于初始条件 $K=5\times10^{-12}\text{m}^2$ 大幅增加，原因是下层孔洞与边缘树脂流动容易形成包络区域增加了填充时间。

图 13 是边缘效应 $K=5\times10^{-8}\text{m}^2$ 时下层合板的填充时间分布图，可以看到各穿孔交界填充时间更长，下层合板靠近排气口的位置存在包络现象，一部分树脂直接从排气口溢出，因此导致充模时间增加。侧流边缘效应导致的包络现象不仅会使充模时间增加，更会增加成型缺陷产生的概率。可以采取减小预制体边缘与密封胶之间的间隙、侧边用密封胶贴紧、提前抽真空将侧边压实、优化注胶口位置等措施^[27]来减小边缘效应带来的影响。

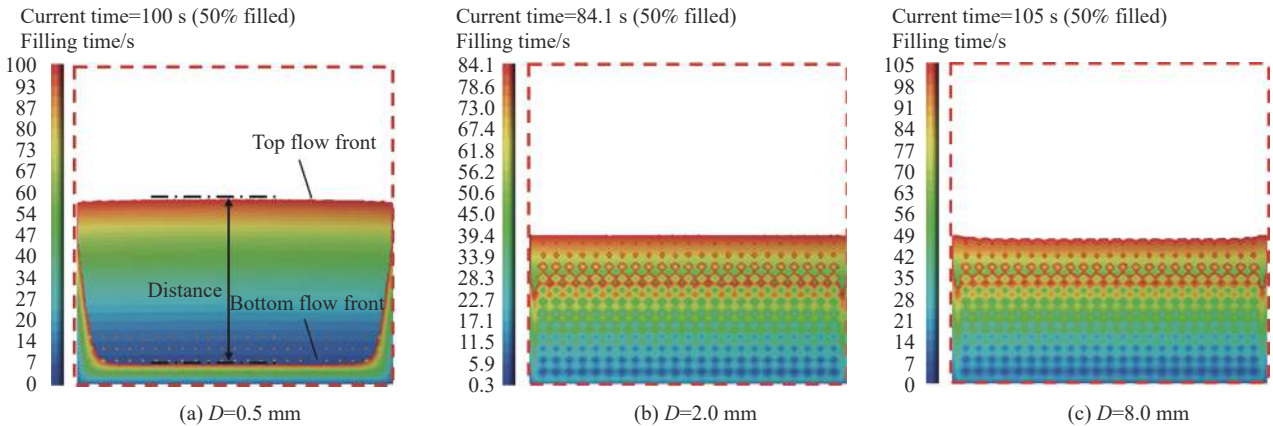


图 11 不同穿孔直径对含阻尼层夹芯复合材料 VARTM 成型树脂流动的影响

Fig. 11 Effects of different perforating diameter on resin flow in VARTM sandwich composites with damping layer

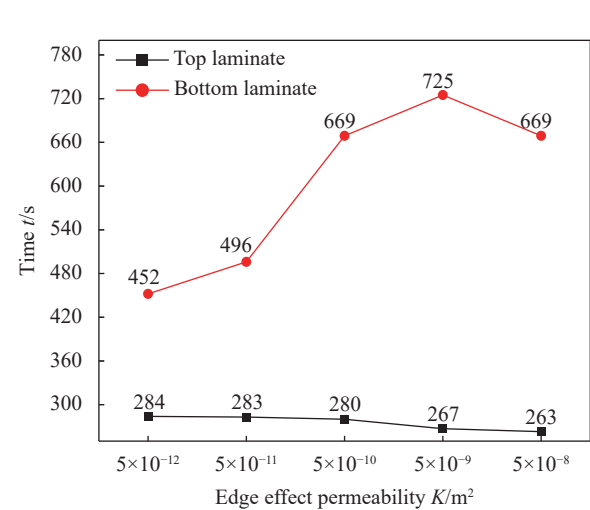


图 12 不同边缘效应的含阻尼层夹芯复合材料预成型体的填充时间
Fig. 12 Filling time of preformed sandwich composites with different edge effects

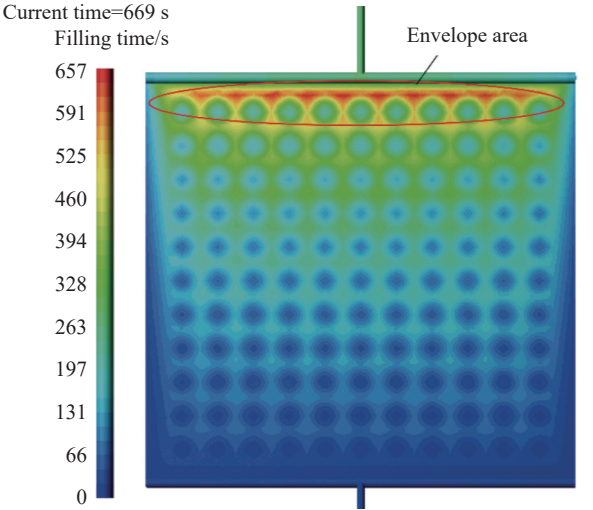


图 13 含阻尼层夹芯复合材料下层合板填充时间分布
Fig. 13 Filling time distribution at bottom laminate of sandwich composites with damping layer

3 结论

针对含阻尼层夹芯复合材料的真空辅助树脂传递 (VARTM) 成型工艺, 通过搭建树脂充填的可视化实验平台, 观测了树脂流动行为。基于仿真软件 RTM-Worx, 建立了含阻尼层夹芯复合材料 VARTM 充模模型, 探究了阻尼层穿孔间距、行距、穿孔直径及“边缘效应”等参数对树脂在预成型体中流动充填的影响, 主要结论如下:

(1) 树脂在含阻尼层夹芯复合材料充模过程中的流动行为可以分为 3 个阶段, 即树脂分别在上、下层合板及孔洞中的流动, 其中上层流动前沿变现为线性扩展, 下层表现为以孔洞为中心向四周扩展;

(2) 建立的仿真模型考虑了纤维和导流网等效渗透率及孔洞的边界层效应, 通过对比了实验和仿真充模的树脂流动状态及不同时刻的填充面积。树脂填充流动的行为和填充速率基本一致, 验证了模型的有效性;

(3) 阻尼层不同穿孔参数预成型体的树脂充填过程仿真显示: ①穿孔列间距影响下层合板流动锯齿状深度, 间距增大树脂流动同步性变差; ②穿孔行距增加使下层合板的前后两行孔洞的树脂流动前沿形成干涉, 产生包络区域, 产生成型缺陷; ③穿孔直径主要影响充模速率, 当直径小于 1 mm 时, 影响了树脂通过孔洞流入下层合板, 充模时间增加; ④侧流边缘效应会导致不良的树脂流动前沿, 在下层合板靠近排气口位置易出现包络现象并增加充模时间。

综合来看, 夹芯复合材料的充模过程受阻尼层的穿孔间距、直径及边缘效应等因素的影响。树脂填充不理想容易导致诸如干斑、熔接痕等缺陷的产生, 因此需要在满足减振要求的同时进一步研究改变注胶方式、优化穿孔位置、控制注胶压力等工艺参数, 从而减少成型缺陷。

参考文献:

[1] SUN S, WANG X, LIANG J, et al. Analysis on fracture behaviour of stitched foam sandwich composites using interlaminar tension test[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2022, 24(3): 1515-1534.

[2] SERRANO-GONZÁLEZ J, LACAL-ARÁNTGUI R. Technological evolution of onshore wind turbines-A market-based analysis[J]. *Wind Energy*, 2016, 19(12): 2171-2187.

[3] ZHOU X Q, YU D Y, SHAO X Y, et al. Research and applica-

tions of viscoelastic vibration damping materials: A review[J]. *Composite Structures*, 2016, 136: 460-480.

[4] LAKES R S. High damping composite materials: Effect of structural hierarchy[J]. *Journal of Composite Materials*, 2002, 36(3): 287-297.

[5] 邓京兰, 王继辉, 连军. RTM充模过程(Ⅱ): 有限元分析[J]. *武汉理工大学学报*, 2003, 25(8): 48-51.

DENG Jinglan, WANG Jihui, LIAN Jun. Computer simulation of RTM mold filling processes(II): FEM analysis[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2003, 25(8): 48-51(in Chinese).

[6] YOON M K, DOLAN D F. Homogenous modeling of VARTM processes with hybrid layered media[J]. *Journal of Composite Materials*, 2008, 42(8): 805-824.

[7] YANG B, JIN T, BI F, et al. Modeling the resin flow and numerical simulation of the filling stage for vacuum-assisted resin infusion process[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014, 33(21): 1976-1992.

[8] SHEVTSOVA S, ZHILYAEV I, CHANG S H, et al. Two-stage numerical approach for reliable recognition of dry spots at the VAP infusion of large composite parts of complex shape[J]. *Composites Structures*, 2021, 259: 113437.

[9] 赖家美, 王德盼, 陈显明, 等. VARTM工艺中高渗透导流介质对树脂充填行为的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2014, 30(7): 120-125, 131.

LAI Jiamei, WANG Depan, CHEN Xianming, et al. Effects of high-permeability medium on resin filing behavior in vacuum assisted resin transfer molding process[J]. *Polymeric Materials Science and Engineering*, 2014, 30(7): 120-125, 131(in Chinese).

[10] 李彩林, 高霞, 柳鑫, 等. VARI液体成型复合材料机盖的数值模拟及工艺验证[J]. *塑料工业*, 2020, 48(2): 92-96, 174.

LI Cailin, GAO Xia, LIU Xin, et al. Digital simulation and progress verification of composite cover plate by VARI technology[J]. *Plastics Industry*, 2020, 48(2): 92-96, 174(in Chinese).

[11] 叶乔丹, 吴晓青. 真空灌注成型工艺导流网和夹层结构沟槽设计的模拟研究[J]. *纤维复合材料*, 2018, 35(1): 25-32.

YE Qiaodan, WU Xiaoqing. Study of flow medium and groove design of sandwich structure VARTM process molding[J]. *Fiber Composites*, 2018, 35(1): 25-32(in Chinese).

[12] GRAY W G, MILLER C T. Examination of darcy's law for flow in porous media with variable porosity[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38: 5895-5901.

[13] 詹东, 杨睿, 孙士勇. RTM成型工艺中纤维体积密度不均匀性对树脂流动的影响[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2017(10): 62-67.

ZHAN Dong, YANG Rui, SUN Shiyong. Effect of fiber volume density heterogeneity on resin flow in RTM molding process[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*,

- 2017(10): 62-67(in Chinese).
- [14] MAGAGNATO D, SEUFFERT J, BERNATH A, et al. Experimental and numerical study of the influence of integrated load transmission elements on filling behavior in resin transfer molding[J]. *Composites Structures*, 2018, 198: 135-143.
- [15] LAWRENCE J M, FREY P, OBAID A A, et al. Simulation and validation of resin flow during manufacturing of composite panels containing embedded impermeable inserts with the VARTM process[J]. *Polymer Composites*, 2007, 28(4): 442-450.
- [16] BERTLING D, KAPS R, MULUGET A. Analysis of dry-spot behavior in the pressure field of a liquid composite molding process[J]. *Aeronautical Journal*, 2016, 7: 577-585.
- [17] ARBTER R. Contribution to robust resin transfer molding[D]. Zurich Switzerland: Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, 2008.
- [18] 金世奇, 李文晓, 刘昊鑫. 缝合夹层结构复合材料树脂传递模塑成型工艺充模仿真[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(12): 3342-3349.
- JIN Shiqi, LI Wenxiao, LIU Haoxin. Filling simulation of stitched sandwich composite by resin transfer molding process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(12): 3342-3349(in Chinese).
- [19] 王科, 赖家美, 鄢冬冬, 等. 缝合泡沫夹芯结构复合材料VARTM工艺树脂充填模拟及验证[J]. *高分子材料科学与工程*, 2015, 31(11): 124-129.
- WANG Ke, LAI Jiamei, YAN Dongdong, et al. Process simulation and verification of stitched foam core sandwich structure by VARTM process[J]. *Polymeric Materials Science and Engineering*, 2015, 31(11): 124-129(in Chinese).
- [20] JISHI H Z, UMER R, CANTWELL W J. Skin-core debonding in resin-infused sandwich structures[J]. *Polymer Composites*, 2016, 37(10): 2974-2981.
- [21] YAN C, WU H L, REN X M, et al. Experimental and numerical study on the permeation behavior of foam-core sandwich panels in LCM[J]. *Fibers and Polymers*, 2021, 22(9): 2612-2625.
- [22] JHAN Y T, LEE Y J, CHUNG C H. Resin flowing analysis in sandwich laminates under VARTM process[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2011, 30(6): 533-545.
- [23] JHAN Y T, LEE Y J, CHUNG C H. Experimental and numerical investigation of the VARTM process with a sandwich structure[J]. *Journal of Composite Materials*, 2012, 46(12): 1417-1430.
- [24] 施赫荣, 王继辉, 倪爱清, 等. 穿孔泡沫夹芯复合材料灌注工艺仿真与方案优选[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(2): 782-793.
- SHI Herong, WANG Jihui, NI Aiqing, et al. Simulation and optimization of infusion process for perforated foam sandwich composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(2): 782-793(in Chinese).
- [25] 雷波, 周特兴, 俞伟, 等. 泡沫夹芯结构板泡沫壁流道内的流动特性[J]. *化工学报*, 2012, 63(3): 775-780.
- LEI Bo, ZHOU Chixing, YU Wei, et al. Flow characteristics in foam wall channel of foam sandwich panel[J]. *CIESC Journal*, 2012, 63(3): 775-780(in Chinese).
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中国国家标准化管理委员会. 纤维增强塑料密度和相对密度试验方法: GB/T 1463—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standardization Administration of the People's Republic of China. Fiber enhanced plastic density and relative density test methods: GB/T 1463—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005(in Chinese).
- [27] 穆文博, 严波. VARTM的边缘效应数值模拟研究[J]. *模具技术*, 2022(2): 1-7.
- MU Wenbo, YAN Bo. Numerical simulation study on the edge effect of VARTM[J]. *Die and Mould Technology*, 2022(2): 1-7(in Chinese).