复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

穿孔泡沫夹芯复合材料灌注工艺仿真与方案优选

施赫荣 王继辉 倪爱清 冯雨薇 李想

Simulation and optimization of infusion process for perforated foam sandwich composite

SHI Herong, WANG Jihui, NI Aiqing, FENG Yuwei, LI Xiang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220323.001

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

大厚度复合材料曲面典型构件的工艺优化

Process optimization of typical composite cambered components with large thickness

复合材料学报. 2021, 38(10): 3302–3313 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201229.005

基于树脂流动的变截面复合材料结构固化过程热–流–固多场强耦合数值仿真

Numerical simulation of heat–flow–solid multi–field strong coupling in curing process of variable cross–section composite structures based on the resin flow

复合材料学报. 2018, 35(8): 2095–2102 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170915.001

真空辅助树脂灌注法制备风电叶片树脂的渗透及缺陷

Resin penetration and defects of wind turbine blades prepared by vacuum assisted resin infusion method

复合材料学报. 2019, 36(12): 2779–2785 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190304.001

环氧树脂灌封结构固化行为数值模拟和工艺优化

Numerical simulation on cure behavior and optimization on cure cycle for encapsulation structure of epoxy resin

复合材料学报. 2021, 38(9): 2914–2924 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200922.001

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 40 卷 第 2 期 2 月 2023 年
Vol. 40 No. 2 Feb 2023

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20220323.001

穿孔泡沫夹芯复合材料灌注工艺仿真与方案优选

分享本文

施赫荣[1]，王继辉[1]，倪爱清*[2]，冯雨薇[1]，李想[3]

（1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院，武汉 430070；2. 武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室，武汉 430070；3. 洛阳船舶材料研究所，洛阳 471039）

摘 要：以穿孔泡沫夹芯复合材料为研究对象，对其真空辅助树脂灌注 (VARI) 工艺进行了实验研究、仿真分析和方案优选。首先，通过实验测试与数值计算分别得到穿孔夹芯结构织物与芯材孔洞的渗透率；然后，对穿孔夹芯结构灌注过程进行三维仿真模拟，并通过实尺度灌注实验验证了仿真模拟的可靠性；最后，基于验证的仿真模型进行工艺参数优选，拟合得到了灌注时间的预测模型。结果表明：数值仿真与实验值基本吻合，能较准确地模拟穿孔夹芯结构成型时的流动过程和孔隙分布；灌注时间的预测模型可用于指导实际生产；通过优化成型工艺参数可控制树脂的流动行为，达到缩短成型时间和降低构件孔隙率的目的。

关键词：穿孔夹芯结构复合材料；真空辅助树脂传递模塑；数值仿真；工艺优选；孔隙

中图分类号：TB332 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-3851(2023)02-0782-12

Simulation and optimization of infusion process for perforated foam sandwich composite

SHI Herong[1], WANG Jihui[1], NI Aiqing*[2], FENG Yuwei[1], LI Xiang[3]

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Technology for Material Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

Abstract: The numerical simulation of the vacuum assisted resin infusion (VARI) process of perforated sandwich composite was verified experimentally, and process optimization was presented thereafter. Firstly, the permeabilities of the fabric and holes of perforated core were obtained experimentally and numerically, respectively. Then, 3D simulation was carried out for the infusion process of the perforated sandwich composite structure and verified by real-scale infusion experiments. Finally, based on the simulation, the process was optimized by investigating the effects of injection position and type on the filling time and product porosity, and later a methodology was proposed to predict the filling time needed. The results show that the numerical simulation is in good agreement with the experiment. The flow patterns during the filling and the porosities of the perforated sandwich structures are in good match with experimental results. The filling time prediction method can be used for practical production instruction. The selection of proper parameters, such as injection position and type, can minimize molding time and product porosity.

Keywords: perforated sandwich structure; vacuum assisted resin infusion; numerical simulation; process optimization; porosity

穿孔夹芯结构复合材料具有比强度比模量高、承载能力强及抗冲击、缓冲吸能性优异等特点，被广泛应用于汽车、船舶及航空航天等诸多领域[1-3]。低成本的真空辅助树脂灌注 (VARI) 工艺适用于整

收稿日期：2022-01-29; **修回日期**：2022-02-24；**录用日期**：2022-03-09；**网络首发时间**：2022-03-24 17:09:18
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220323.001
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金 (20211h0310)
Fundamental Research Funds for the Central Universities (20211h0310)
通信作者：倪爱清，博士，副研究员，硕士生导师，研究方向为树脂基复合材料性能及模拟仿真 E-mail: ani@whut.edu.cn
引用格式：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).

体化成型大尺寸、结构复杂的复合材料制品[4-5]，在实际生产中常通过铺设导流网 (Distribution medium，DM) 或对泡沫进行开槽开孔处理以促进树脂流动，确保构件在树脂凝胶前完成浸润，此外孔槽内部的树脂柱还可以提高芯材与纤维面板的界面粘结强度和夹芯结构的 Z 向力学性能[6-7]。

穿孔夹芯复合材料灌注成型工艺的关键是实现预成型体和孔槽的充分浸渍，因此研究树脂在穿孔夹芯结构的流动行为非常重要。传统的试错法成本高、优化周期长，难以对 VARI 成型工艺参数进行直观且有效的综合评判。借助数值仿真技术研究穿孔夹芯复合材料 VARI 成型工艺，能够有效缩短新产品开发周期并降低成本，精准控制构件尺寸和质量[8-9]。

目前国内外针对液体成型工艺仿真的研究普遍将纤维预制体视为均一化的多孔介质，采用达西定律模拟树脂在预制体中的渗流行为[10]。金世奇等[11] 采用 PAM-RTM 软件对金属线缝合夹层结构复合材料的树脂灌注工艺进行了充模仿真，研究了孔洞直径及注胶形式对流场的影响，发现采用线注射时，制品浸润情况良好，无缺陷产生。Zhao 等[12] 研究了导流网长度与注胶形式对开槽泡沫夹层复合材料 VARI 成型时间的影响，发现充模时间随导流网与预制件长度比值的增加而减少，采用中心注射比边缘注射所需充模时间短，点注射灌注时间较线注射长。Halim 等[13] 研究了不同的开孔形式对充模时间和结构整体质量的影响，研究结果表明，当孔间距为 40 mm 时树脂前沿难以交汇，试样会出现明显的干斑。因此把握灌注时间、制品质量及制品品质三者之间的平衡至关重要。Petrescue 等[14] 研究了树脂黏度、注射压力及开孔构型等参数对夹芯复合材料灌注成型工艺的影响，实验结果表明这些参数对构件灌注时间和质量有着重要的影响。

王科等[15] 采用“长条”模型代替缝合芯材中的树脂流动模型，对缝合结构复合材料的灌注成型过程进行模拟，发现模拟结果与可视化实验中的树脂流动情况非常接近。魏俊伟等[16] 针对大尺寸夹芯结构复合材料的 VARI 成型工艺，提出了一种等效建模法，该模型计算所得充模时间与实尺度实验的时间基本一致，能在满足仿真计算要求的前提下，提高计算效率。Jhan 等[17] 从实验、模拟和数值分析三个方面探讨了夹层结构灌注工艺中的树脂流动特性，采用圆形管单元表示芯材的孔槽，在 RTM-Worx 软件中利用 3D 模型模拟树脂流动前沿，模拟结果误差小于 20%。同时提出等效厚度的概念来定义夹芯结构的整体孔隙度和孔隙空间 (S_s)，推导出渗透率与 S_s 的相关性预测方程，从而简化渗透率计算，2D 等效模型显著提高了计算效率。PAM-RTM 软件是目前使用最为广泛且简便的树脂灌注仿真软件，为了模拟开孔泡沫夹芯结构中的树脂流动行为，Poodts 等[18] 将孔简化为等截面二维网格，Falaschetti 等[19] 和 Yan 等[20] 利用 Hagen-Poiseuille 定理得到孔的等效渗透率，并将其视为孔隙率为 1 的多孔介质，根据以上简化构建出 3D 模型后进行流动仿真。

目前针对泡沫夹芯结构复合材料的液体成型工艺仿真研究主要集中于缝合夹芯结构及开槽处理泡沫，很少见到关于穿孔泡沫夹芯复合材料的 VARI 工艺仿真报道，且文献报道中往往忽略重力的影响，降低了仿真模型的准确度，尤其对于大尺寸且厚度相对较厚的夹芯复合材料而言，影响尤为显著；此外，极少文献报道同时兼顾充模时间与孔隙率的控制研究。

本文以穿孔泡沫夹芯复合材料为研究对象，考虑充模过程中的重力影响，采用 PAM-RTM 软件模拟 VARI 成型过程中的树脂流动行为及制件的孔隙分布，通过实验验证并迭代修正仿真模型参数，拟合得到预测函数，以预测不同树脂黏度条件下不同尺寸穿孔夹芯复合材料的灌注时间，为进一步开发穿孔夹芯结构复合材料提供具有参考价值的成型工艺参数。

1 理论和实验

1.1 夹芯结构孔洞渗透率模型

渗透率反映的是树脂在材料中流动的难易程度，是 VARI 工艺仿真的重要参数。穿孔夹芯结构中，树脂的实际流动区域可分为上下层纤维面板与芯材孔洞，如图 1 所示。本文基于计算流体力学表征孔洞渗透率，由实验测得织物的渗透率。

假定树脂在灌注过程中为不可压缩的牛顿流体，由于孔洞的半径较小且流速较慢，树脂在孔洞中的流动可视为层流，因此可用修正的哈根-泊肃叶方程来描述树脂在孔洞中的流动[21-22]。选取芯材中的一个孔洞进行分析，如图 2 所示，树脂在半径为 r、长度为 l 的圆形截面管道中的流量 Q 可表示为

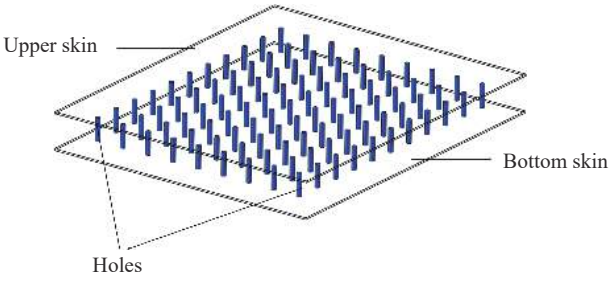
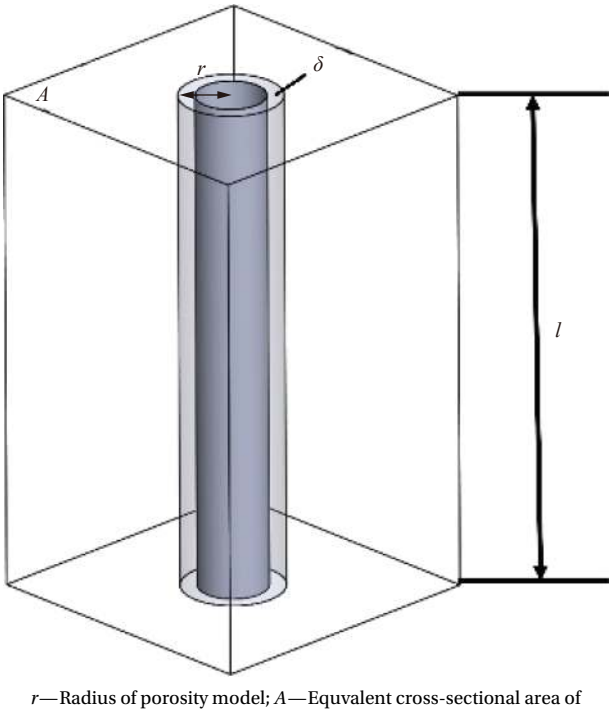


图 1　穿孔夹芯结构中树脂流动区域

Fig. 1　Resin flow area in perforated sandwich composite



r—Radius of porosity model; A—Equvalent cross-sectional area of porosity model; l—Length of porosity model; δ—Thickness of boundary layer

图 2　孔洞渗透率计算模型

Fig. 2　Calculation model of pore permeability

$$Q = -\frac{\pi(r-\delta)^4}{8\mu}\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}l} \tag{1}$$

式中：μ为树脂黏度；δ 为边界层的厚度；$\mathrm{d}P/\mathrm{d}l$为压力梯度。

与此同时，树脂在孔洞流动时，雷诺系数较小，同样可以由 Darcy 定律表示[23]：

$$Q = -K\frac{A}{\mu}\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}l} \tag{2}$$

式中：K 为渗透率常数 (m^2)；A 为等效流动区域横截面积。

结合式 (1) 和式 (2) 可得圆形管道的等效渗透率：

$$K = \frac{\pi(r-\delta)^4}{8A} \tag{3}$$

本文研究的夹芯结构中孔洞半径 r=1 mm，δ=0.368 mm，将数据代入式 (3) 可计算得孔洞渗透率 K=2.51×10^{-11} m^2。

1.2　材料参数测量实验

PMX-200-100cs 二甲基硅油、2511 环氧树脂、玻璃纤维缎纹织物 (SF，单层厚度为 0.1875 mm)、柔性真空袋、导流网、吸胶毡、空压软管等均由洛阳船舶材料研究所提供。实验设备：真空泵，浙江台州求精真空泵有限公司。

采用黏度计 (Brookfield 公司) 测定实验环境温度 (25℃) 下树脂与硅油的黏度，采用一维渗透率测试方法测定玻璃纤维织物面内渗透率 K_x、K_y，采用实验室自制渗透率测试装置测定厚度方向的渗透率 K_z[24]，渗透率测试所用液体均为硅油。测试结果见表 1，将作为工艺仿真的输入参数。

表 1　材料参数测试结果

Table 1　Test results of material parameters

Resin viscosity/(Pa·s)	Silicone oil viscosity/(Pa·s)	Fiber volume fraction/vol%	Permeability/(10^{-11} m^2)		
			K_x	K_y	K_z
0.21	0.1	49.2	3.26	3.26	0.1987

Notes: K_x, K_y—In-plane permeability; K_z—Permeability in thickness direction.

1.3　复合材料孔隙率计算

在 VARI 工艺中，复合材料制件孔隙主要包括产生于纤维束之间的宏观孔隙和产生于纤维束内的微观孔隙。当树脂流速较低时，纤维束内的毛细管作用力相较纤维束间的黏性阻力大，树脂优先在纤维束内流动，使纤维束间的空气无法及时排除，易于产生宏观孔隙，如图 3(a) 所示，而当树脂流速较快，毛细管作用力较小时，树脂优先在纤维束间流动，易在纤维束内产生微观孔隙[25]，如图 3(b) 所示。

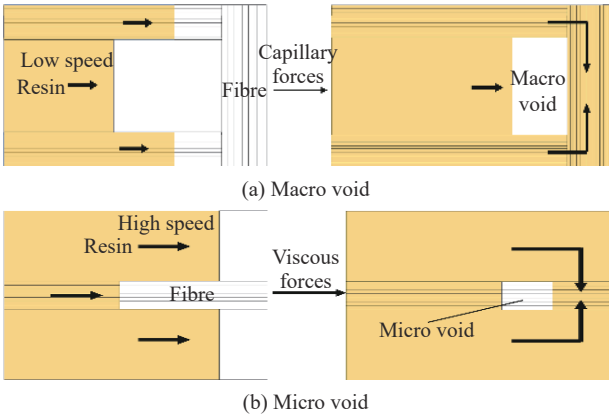


图 3 宏观/微观孔隙产生机制

Fig. 3 Generation mechanism of macro/micro void

根据 Labat 等[26]提出的孔隙计算模型，复合材料液体成型工艺中制品的宏观、微观孔隙与树脂流动速度呈对数关系：

$$V_M = -32.28 - 11.8\lg v \tag{4}$$

$$V_m = 6.35 + 2.35\lg v \tag{5}$$

式中：V_M 为宏观孔隙；V_m 为微观孔隙；v为树脂流动速度 (m/s)。

Patel 等[27-28]指出前沿流动速率与修正毛细管数存在如下关系：

$$C_a^* = \frac{\mu v}{\gamma\cos\theta} \tag{6}$$

式中：C_a^*为修正毛细管数；γ 为树脂表面张力；θ 为纤维与树脂的静态接触角。

结合式 (4)~(6)，代入所用 2511 环氧树脂的参数值μ=0.21 Pa·s，γ=0.0464 N·m^{-1}，θ=48.6°，从而得到仿真模型中孔隙率与修正毛细管数的函数关系式：

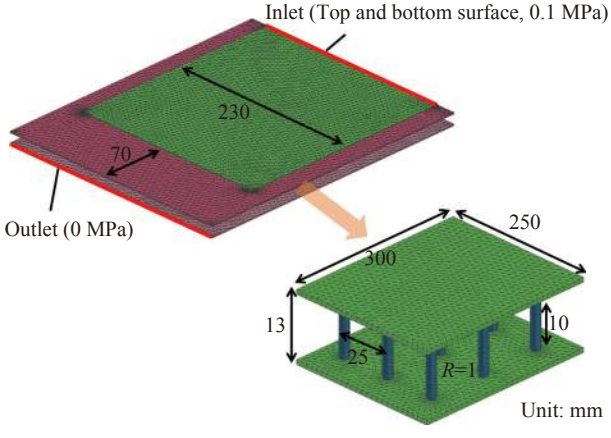
$$V_M = -22.42 - 11.8\lg C_a^* \tag{7}$$

$$V_m = 4.39 + 2.35\lg C_a^* \tag{8}$$

2 穿孔泡沫夹芯复合材料 VARI 工艺仿真与实验验证

2.1 穿孔泡沫夹芯复合材料仿真模型建立

穿孔夹芯结构模型主要分为 4 个部分：由下至上依次为下层玻璃纤维面板、用直细管模型替代的聚氯乙烯泡沫板 (300 mm×250 mm×10 mm，开孔间距 25 mm，直细管半径 R 为 1 mm)、上层玻璃纤维面板、导流网。3D 有限元模型如图 4 所示，考虑运算时间及收敛性，选取的网格尺寸为 5 mm，总单元数为 106 251，单元类型为四面体单元。边界条件设置为短边一侧恒压力面注射，基于实验压力值设定注射压力为 0.1 MPa，另一端下层纤维面板处设置排气口，压力为 0 MPa。25℃环境下 2511 环氧树脂的黏度与时间关系如图 5 所示，由于灌注所需时间较短，不足 20 min，因此仿真过程中设定树脂黏度为 0.21 Pa·s。



R—Radius of hole

图 4 穿孔泡沫夹芯复合材料仿真模型

Fig. 4 Simulation model of perforated foam sandwich composite

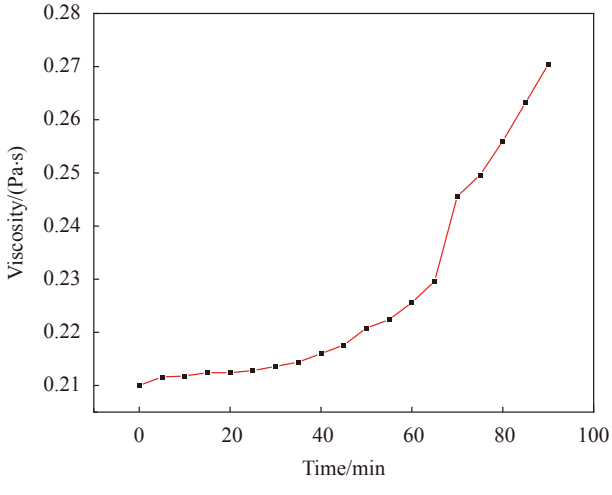


图 5 树脂黏度与时间关系

Fig. 5 Relation of resin viscosity and time

2.2 实 验

穿孔泡沫夹芯复合材料真空灌注成型实验中，预制体、导流网的铺设、进胶口与排气口的设置，与仿真模型一致。为了便于观测灌注成型中树脂的填充过程，选用具有标识刻度 (20 mm 正方形) 的透明玻璃板，同时用摄像机 (尼康 D90) 记录上、下层纤维面板的树脂流动情况，实验示意图如图 6 所示。

采用显微照相法测定最终制件的孔隙率。根据 GB/T 3365—2008 标准[29]，在上、下层面板对

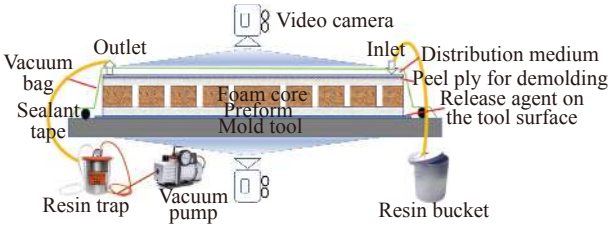


图 6　实验装置示意图

Fig. 6　Schematic of experimental setup

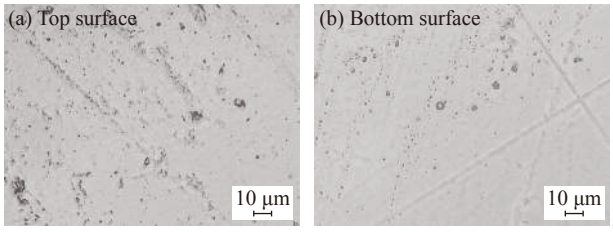


图 7　穿孔泡沫夹芯复合材料上层和下层纤维层金相图像

Fig. 7　Metallographic diagrams of top surface and bottom surface of perforated foam sandwich composite

称选取 6 个尺寸为 10 mm×20 mm 的试样。打磨抛光后使用金相显微镜拍摄试样的 5 个截面，每个截面拍摄两张图像。使用 ImageJ 对拍摄图像进行图像分析，得出每张图像上孔隙所占面积，并计算每张图像的孔隙率，最后将所有截面图像的孔隙率平均值作为体积孔隙率，与仿真结果对比。试验所用显微镜为凤凰光学 PH-M3230BD，为了保证孔隙与树脂、纤维能清晰分辨，同时保证视野范围足够广，显微放大倍数选取 40 倍。选取上、下层金相照片如图 7 所示，孔隙率实验结果如图 8 所示 (其中 1、2、3 号试样取自下层纤维面板，4、5、6 号试样取自上层纤维面板)。

2.3　模拟与实验结果对比

上层纤维面板在 34 s、78 s、260 s 时刻与下层纤维面板在 350 s、500 s、700 s 时刻树脂流动的仿真与实验对比如图 9、图 10 所示。可以看出，穿

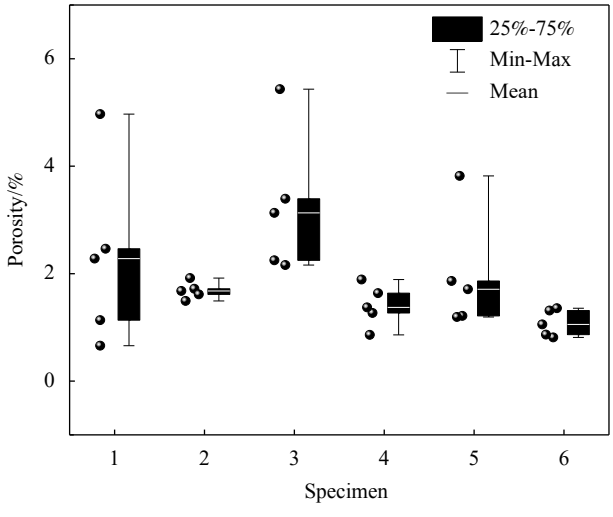
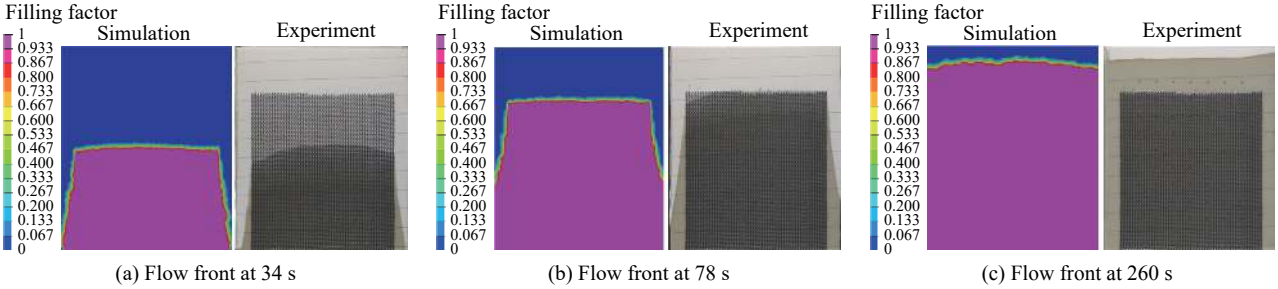


图 8　穿孔泡沫夹芯复合材料孔隙率实验结果

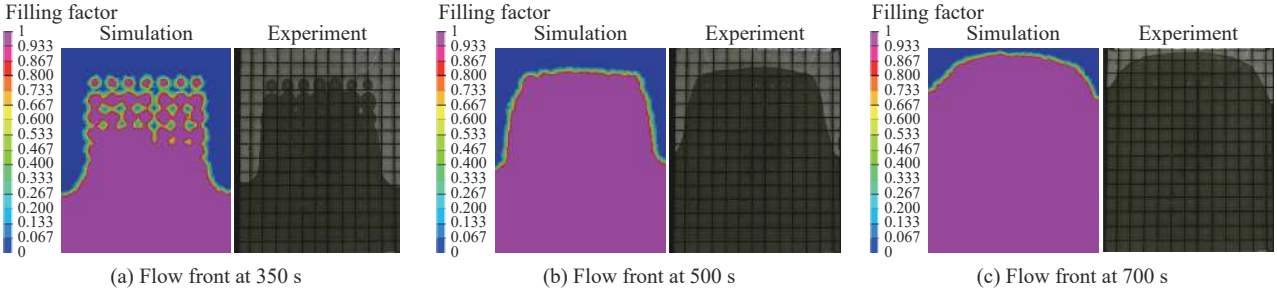
Fig. 8　Experimental results of porosity of perforated foam sandwich composite



(a) Flow front at 34 s　(b) Flow front at 78 s　(c) Flow front at 260 s

图 9　34 s、78 s 和 260 s 穿孔泡沫夹芯复合材料上表面树脂流动情况对比

Fig. 9　Comparison of resin flow on top surface of perforated foam sandwich composite between simulation and experiment at 34 s, 78 s, 260 s



(a) Flow front at 350 s　(b) Flow front at 500 s　(c) Flow front at 700 s

图 10　350 s、500 s 和 700 s 穿孔泡沫夹芯复合材料下表面树脂流动情况对比

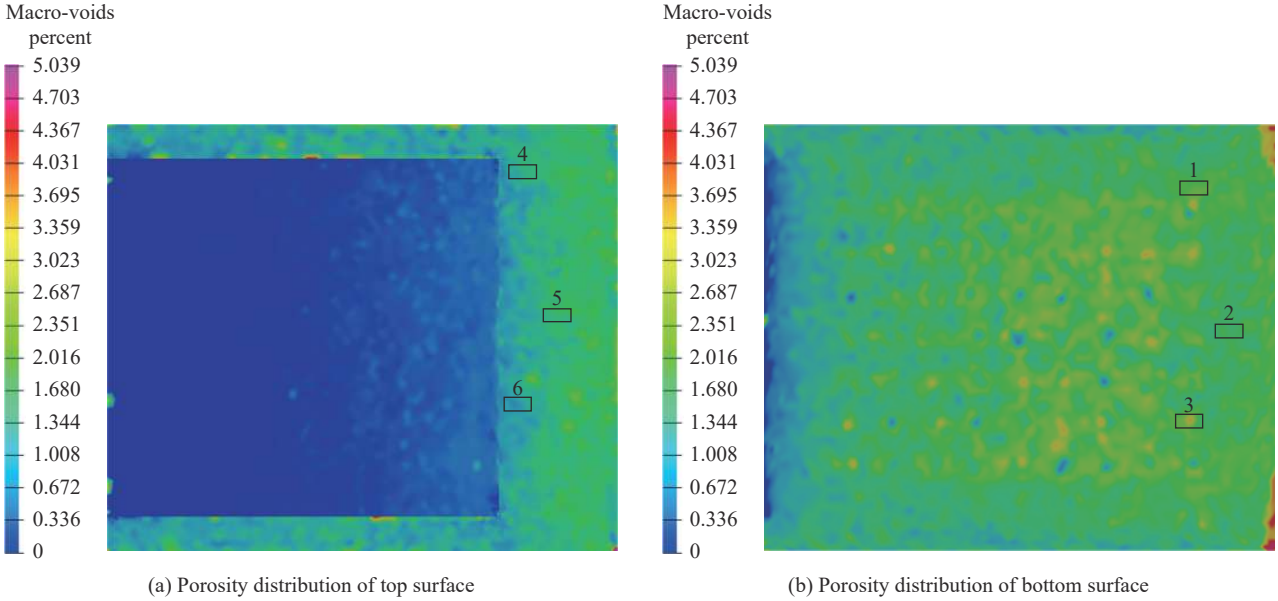
Fig. 10　Comparison of resin flow on bottom surface of perforated foam sandwich composite between simulation and experiment at 350 s, 500 s, 700 s

孔泡沫夹芯结构复合材料充模过程中，环氧树脂的流动过程为首先快速浸润导流网，而后经上层纤维面板流至夹层泡沫，快速填充泡沫孔洞并径向填充下层纤维面板。在上层纤维面板浸渍过程中，由于边缘未铺设导流网，因此树脂在中间的流动要明显比两侧快，流动前沿呈现梯形，如图 9(a)、图 9(b) 所示；而由于边缘效应的存在[30]，树脂在边缘流动较快，因此在充模后期，流动前沿逐渐趋于一致，如图 9(c) 所示。从选取的 3 个时刻来看，充模仿真值与实验结果吻合度较高，上层纤维面板的实验充模时间为 380 s，仿真结果为 400 s，误差 5.26%。

下层纤维面板的充模过程如图 10 所示，在浸润时，由于上层纤维面板铺设了导流网，因此，下层纤维面板树脂的填充形式主要为中间孔洞向两侧边沿填充，树脂流动前沿呈现凸台状，如图 10(a)、图 10(b) 所示，同样由于边缘效应，随时间推移，凸台高度逐渐降低，据此原因，树脂在不同时刻到达出胶口一端，先抵达出气口的树脂易封闭出胶口，与随后到达的树脂交汇后反向包裹空气形成干斑，影响制品质量。图 10(a) 中树脂流动前沿不连续，这是由于上层纤维面板铺设了导流网，树脂是通过泡沫芯材中的孔洞流至下层纤维面板，而非从注胶口一侧逐渐向前浸渍，350 s 时不同孔洞间流入的树脂没有发生交汇，而随着时间的推移，树脂不断流入下层纤维面板并发生交汇，因而图 10(b)、图 10(c) 树脂流动前沿是连续的。最终仿真充模时间为 997 s，实际实验充模时间 981 s，模拟与实验结果基本一致。由此可见，上述仿真能够较准确地模拟穿孔泡沫夹层结构的树脂填充过程。

图 11 为制件上、下纤维面板的孔隙分布仿真结果。可以看出，仿真的最大孔隙率为 5.039%，最大孔隙率位于下层纤维面板的出胶口一侧，这是由于流动后期下层纤维面板的树脂流动前沿呈现波浪状，树脂并非同时抵达出胶口，边缘两角的气体被树脂包裹，不能及时排出，如图 10(c) 所示；而由于上层纤维面板铺设了导流网，树脂可以快速均匀地浸渍纤维，因此上层纤维面板平均孔隙率明显低于下层纤维面板；此外，下层纤维面板中间区域的孔隙率大于四周，这是由于下层纤维面板的浸渍主要是通过芯材的孔洞，在孔洞下方及孔洞与孔洞之间会产生树脂交汇处，交汇处的空气不易排出，因此孔隙率较高[31]。为了验证孔隙率预测模型的准确性，在仿真结果中提取如图 11 所示 6 处典型位置的孔隙率结果并与孔隙率测试结果进行对比，对比结果如表 2 所示。6 个位置的孔隙率仿真结果的平均误差为 7.85%，与实验结果吻合良好。

综上所述，本文所建立的仿真分析模型可较准确地预测树脂在穿孔夹芯结构复合材料的填充情况及孔隙分布情况，这一仿真模型可用于后续



(a) Porosity distribution of top surface (b) Porosity distribution of bottom surface

图 11 穿孔泡沫夹芯复合材料上、下纤维层孔隙分布

Fig. 11 Porosity distribution of top surface and bottom surface of perforated foam sandwich composite

表 2　穿孔泡沫夹芯复合材料典型位置孔隙率结果对比

Table 2　Porosity measurement results in typical locations of perforated foam sandwich composite

Position		1	2	3	4	5	6
Porosity/%	Simulation	2.31	1.63	3.56	1.45	1.66	0.90
	Experiment	2.30	1.68	3.27	1.41	1.96	1.08

穿孔夹芯结构复合材料真空灌注工艺优化设计。

3　穿孔泡沫夹层结构复合材料成型工艺优化设计及预测

3.1　穿孔泡沫夹层结构复合材料成型工艺优化设计

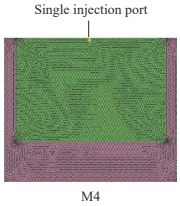
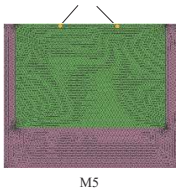
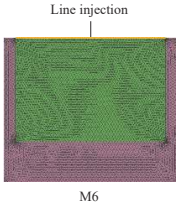
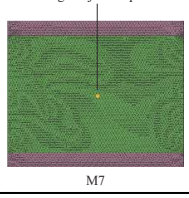
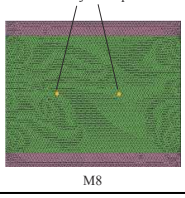
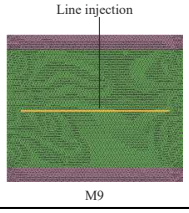
为了优化工艺参数，获得成型时间短且孔隙率低的制品，在工艺仿真实验验证的基础上，进一步研究了注胶口形式、注胶口位置、导流网铺放位置等因素对充模时间和孔隙率的影响。大厚度夹芯复合材料在实际生产过程中，为了更好地浸润增强纤维，提高成型效率，常用导流网来辅助树脂在纤维预制体中的流动，因此需要研究导流网铺放位置对成型时间及孔隙分布的影响。首先讨论导流网铺设在上方的情况，采用短边单点注射 (M1)、短边双点注射 (M2)、短边线注射 (M3)、长边单点注射 (M4)、长边双点注射 (M5)、长边线注射 (M6)、中心单点注射 (M7)、中心双点注射 (M8) 和中心线注射 (M9) 共 9 种设计方案，如表 3 所示。

针对以上 9 种设计方案，由仿真得到的充模时间与最大孔隙率结果如图 12 所示。可以看出，当注射口的位置一定时，增加注射口的数目可以缩短注射时间，但注射口之间易产生树脂交汇区[32]，空气被树脂包裹在交汇区无法排出，从而产生较大的孔隙；采用线注射能够在不增加最大孔隙率的情况下有效缩短成型时间；对于矩形穿孔泡沫夹层复合材料而言，当注射形式一定时，将导流网铺设在中部，采取中心线注射所需的时间远少于长边注射及短边一侧注射，从图 12(a) 可以看出，中间线注射方案的充模时间为 554.2 s，比长边线注射缩短约 450 s。此外，从孔隙率模拟结果来看，这一方案所得制件的最大孔隙率最低，为 5.66%。

对于聚合物基复合材料而言，孔隙是不可避免的，因此，控制聚合物基复合材料的孔隙显得

表 3　穿孔泡沫夹芯复合材料真空辅助树脂灌注 (VARI) 工艺设计方案

Table 3　Different vacuum assisted resin infusion (VARI) process setups for perforated foam sandwich composite

Distribution medium (DM) location	Injection form		
Short side	M1	M2	M3
Long side	 M4	 M5	 M6
Central section	 M7	 M8	 M9

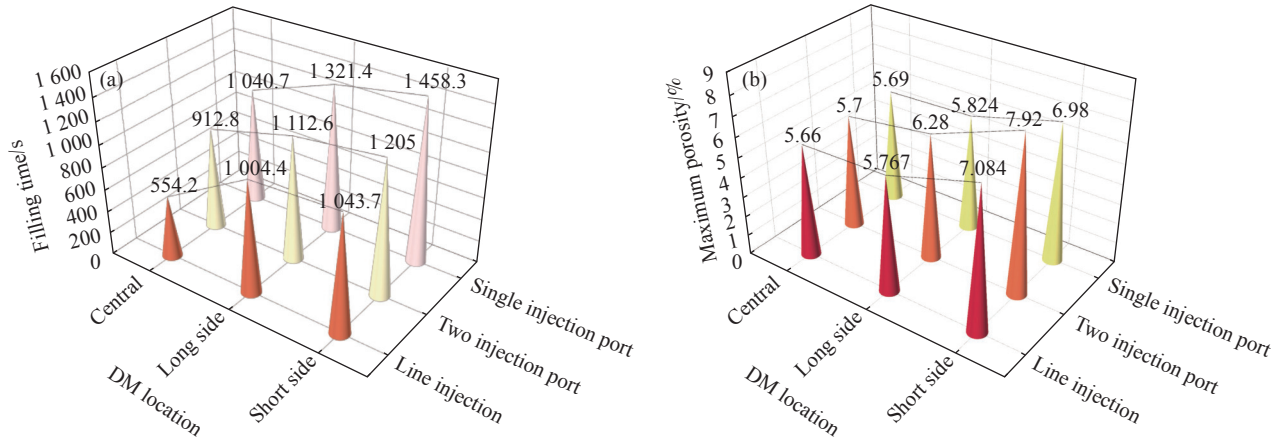


图 12　穿孔泡沫夹芯复合材料 VARI 成型 9 种模型充模时间与最大孔隙率对比

Fig. 12　Comparison of filling time and maximum porosity of 9 models of VARI for perforated foam sandwich composite

尤为重要，它直接影响复合材料的力学性能、疲劳性能及制件结构的使用寿命[33-34]。从上述 9 种方案的仿真结果来看，最大孔隙率均在 5% 以上，因此仍需进一步优化成型工艺方案，降低制件孔隙率。

对于穿孔夹芯结构而言，导流网铺放位置主要有 4 种，如图 13 所示，分别为铺放于上层纤维面板上、下层纤维面板下、芯材上及芯材下(M10~M13)。采用短边一侧面注射对这四种方案进行模拟仿真，截取纤维面板的孔隙分布如图 14 所示。可以看出，在同一边界条件下，由于重力效应的影响，导流网铺放在预制件下方所需的成型时间会比上方长，但差别很小，仅有 3 s，可以忽略，对成型效率没有影响，相比于将导流网铺放在预制件上、下方，铺放在芯材与上下纤维面板之间可以有效缩短成型所需时间，充填时间由原来的 1 000 s 缩短到 910 s 左右，但会增加制品的最大孔隙率，并且导流网无法从成型后的复合材料中取出，也会使成型工艺操作更加复杂。

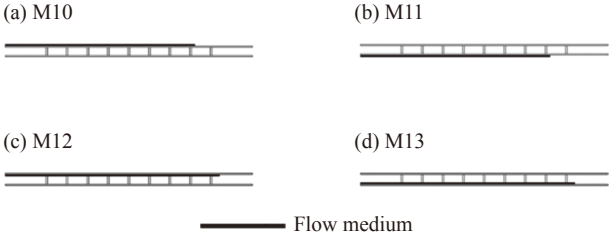


图 13　穿孔泡沫夹芯复合材料 VARI 成型导流网 (DM) 铺放模型

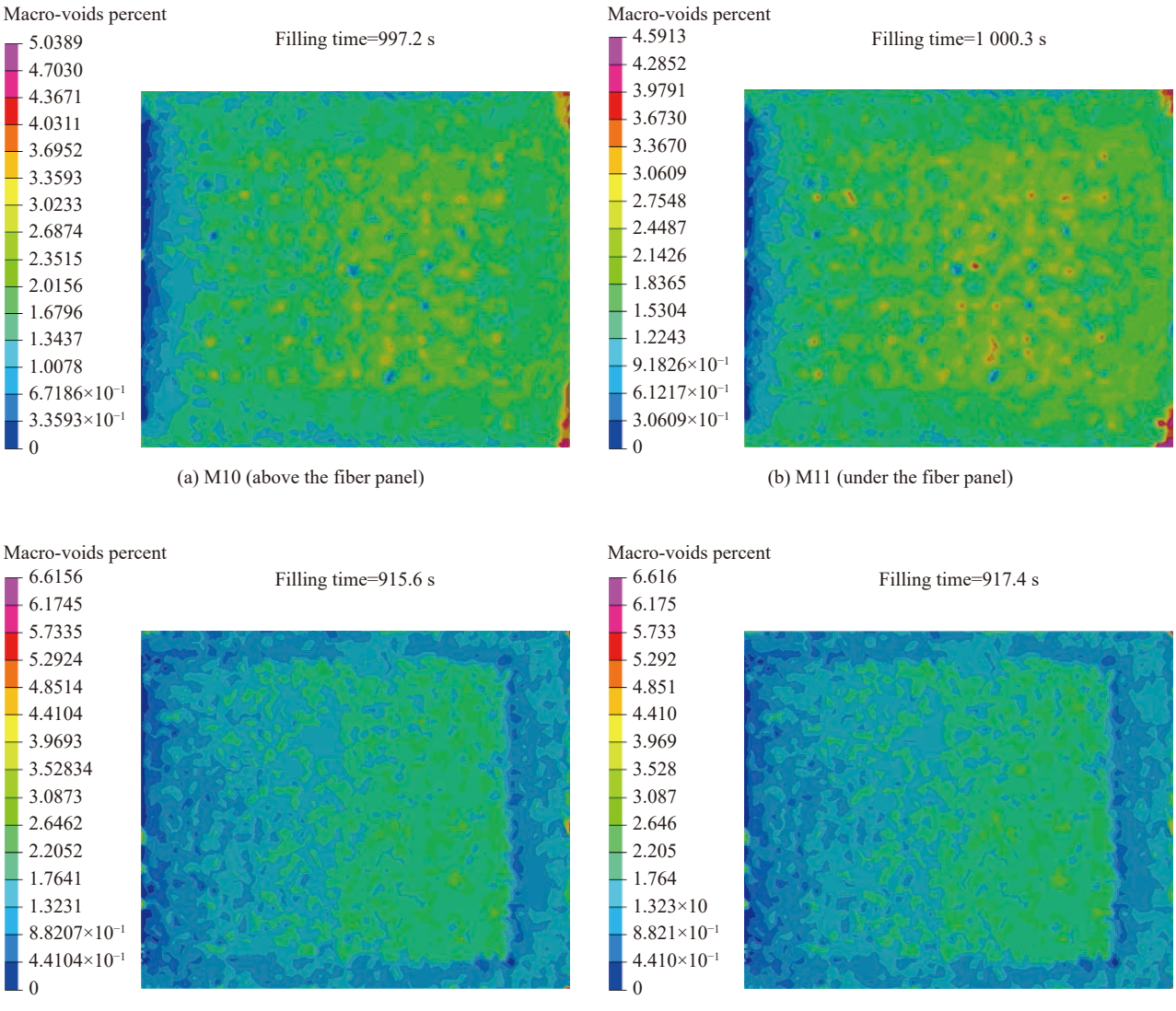
Fig. 13　Layout model of distribution medium (DM) of VARI for perforated foam sandwich composite

从图 14(b) 可以看出，在预制件下方铺放导流网能够在不影响成型效率的情况下，降低制品最大孔隙率，最终制件的最大孔隙率为 4.59%，平均孔隙率为 1.5%~3%，同时，在重力效应的影响下，也能够使树脂更好地充满芯材的孔洞，避免孔洞中残留气体，成型后形成缺陷，影响产品质量；此外，在实际生产过程中，导流网放置于底部会直接与刚性模具接触，刚性模具变形小，不会封闭导流网的导流通道。从孔隙分布图可以发现，最大孔隙集中出现于排气口一侧的两角，成型后可以通过边角料切除等操作获得性能较好的夹芯复合材料。

3.2　穿孔泡沫夹层结构复合材料成型预测模型

复合材料具有可设计性，穿孔夹芯复合材料在实际生产过程中，往往会根据工程应用选择不同的树脂，生产的产品尺寸也不同，因此研究穿孔夹芯结构 VARI 工艺的成型时间与树脂黏度及制件尺寸的依赖关系具有重要的工程意义。

在 M11(树脂黏度为 0.21 Pa·s、模型尺寸为 300 mm×250 mm×14 mm) 的基础上，通过仿真计算得到在优选成型工艺条件下不同树脂黏度 μ、不同缩放比例 x 下复合材料的充模时间 t_1、t_2，运用 Origin 软件对这些仿真数据进行拟合，最终拟合结果如图 15 所示。对比仿真结果与拟合曲线发现，拟合系数均达到 0.999，能够准确反映穿孔夹芯结构复合材料真空灌注时间随树脂黏度及制件尺寸的变化规律。从图 15(a) 可以看出，当树脂黏度低于 0.5 Pa·s时，小尺寸夹芯复合材料真空灌注时间小于 1 h，在满足凝胶时间的前提下，应尽可能以低孔隙率为目标选取适合的注射条件；而当制件尺寸在1 m 左右时，采用这一成型条件所需充模达 18 476 s，因此不拟选用固化速率快的树



(a) M10 (above the fiber panel)

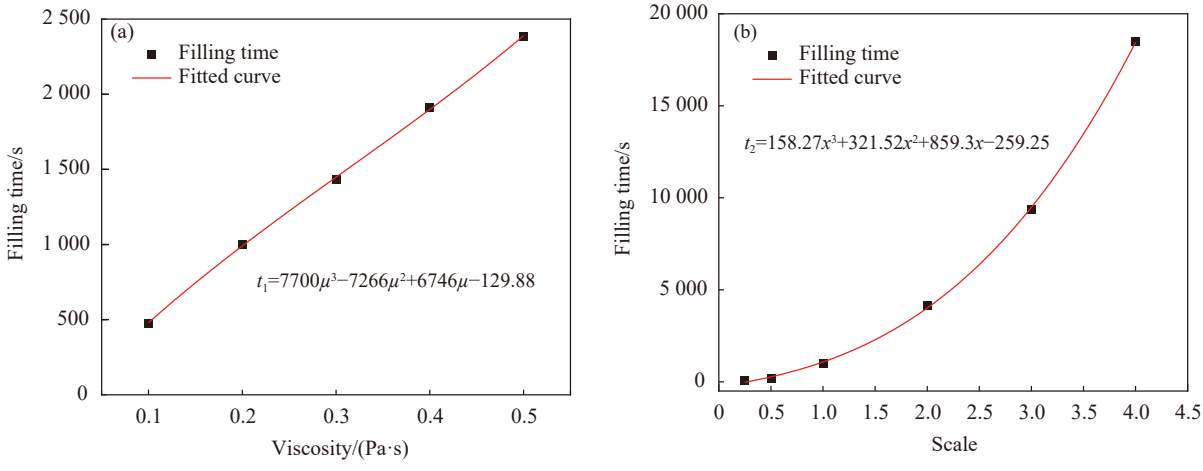
(b) M11 (under the fiber panel)

(c) M12 (above the core)

(d) M13 (under the core)

图 14　不同导流网铺放位置的穿孔泡沫夹芯复合材料孔隙率分布

Fig. 14　Porosity distribution of perforated foam sandwich composite with different laying positions of diversion network



t_1, t_2—Filling time; μ—Viscosity; x—Scale

图 15　穿孔泡沫夹芯复合材料灌注时间预测模型

Fig. 15　Prediction of the filling time of perforated foam sandwich composite

脂，防止成型过程中发生树脂凝胶，可以考虑选用黏度较低的树脂或提高成型温度从而降低黏度、也可考虑改变注胶形式，选用多段同时注射或前文描述的将导流网铺放于上层纤维面板中部进行线注射，从而提高生产效率。

在后续的穿孔夹芯结构复合材料生产当中，若所选纤维的渗透率、芯材开孔密度与本文接近时，可直接将树脂黏度代入函数关系式 $t_1=7700\mu^3-7266\mu^2+6746\mu-129.88$ 以初步判断所需充模时间，若所选树脂黏度接近 0.21 Pa·s 时，也可根据函数关系式 $t_2=158.27x^3+321.52x^2+859.3x-259.25$，结合实际生产的复合材料尺寸，预估成型时间，进而合理选择树脂、注胶方式等。

4 结论

基于流体力学理论和多孔介质的渗透率理论，通过计算和实验确定了穿孔夹芯结构复合材料芯材孔洞与上下层纤维织物的渗透率，进行了穿孔夹芯结构复合材料真空灌注过程的三维充模仿真，将充模时间和制品孔隙率的仿真结果与实验结果进行比较，验证了这一仿真模拟的准确性。

为了优化工艺设计，本文考察了注射位置、注射形式及导流网铺放在不同位置对充模结果的影响；根据最短充模时间和最低制品孔隙率，优选出工艺方案，通过仿真计算得到不同黏度、不同尺寸制件的充模时间，拟合得到充模时间依赖于树脂黏度和制件尺寸的函数关系式。得到以下结论：

(1) 穿孔夹芯结构的充模仿真结果与实验结果吻合度较高，建立的模型能够较准确地模拟出真空辅助树脂灌注 (VARI) 成型工艺中树脂在穿孔夹芯结构中的流动行为及最终产品的孔隙分布；

(2) 制件最上层注胶口的位置、数量及注胶形式都对灌注时间和孔隙率分布有着重要的影响，多点注射会增大孔隙产生的可能性，中间线注射可以有效地缩短灌注时间，还可得到孔隙率较低的制品；

(3) 在重力效应的影响下，对于穿孔夹芯结构而言，将导流网铺设在下层纤维面板与模具的接触处可以在不影响成型效率的前提下，降低制件的最大孔隙率，同时也能使芯材中的孔洞得到更有效的填充；

(4) 研究了树脂黏度、制品尺寸与充模时间的函数依赖关系，拟合得到函数关系式，利用该关系式，能够对不同树脂、不同尺寸制件的成型时间进行预测，便于选择合适的成型工艺条件，为实际生产提供指导。

参考文献：

[1] 朱基炜. 穿孔泡沫夹层复合材料力学性能研究及应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
ZHU Jiwei. Study and application of mechanical properties of perforated foam sandwich composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017(in Chinese).

[2] MOHAMED M, ANANDAN S, HUO Z, et al. Manufacturing and characterization of polyurethane based sandwich composite structures[J]. Composite Structures，2015，123(5)：169-179.

[3] YANG B X, OUYANG J, LI X J. Simulation of fiber reinforced composite materials mold filling process and mechanical properties analysis[J]. Fuel and Energy Abstracts，2011，166(7)：1129-1136.

[4] YALKIN H E, ICTEN B M, ALPYILDIZ T. Enhanced mechanical performance of foam core sandwich composites with through the thickness reinforced core[J]. Composites Part B: Engineering，2015，79(9)：383-391.

[5] YALKIN H E, ICTEN B M, ALPYILDIZ T. Tensile and compressive performances of foam core sandwich composites with various core modifications[J]. Journal of Sandwich Structures & Materials，2017，19(1)：49-65.

[6] TAO J, LI F, ZHAO Q L, et al. In-plane compression properties of a novel foam core sandwich structure reinforced by stiffeners[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites，2018，37(2)：134-144.

[7] STEEVES C A, FLECK N A. In-plane properties of composite laminates with through-thickness pin reinforcement[J]. International Journal of Solids and Structures，2006，43(10)：3197-3212.

[8] GROSSING H, STADLMAJER N, FAUSTER E, et al. Flow front advancement during composite processing: Predictions from numerical filling simulation tools in comparison with real-world experiments[J]. Polymer Composites，2016，37(9)：2782-2793.

[9] SHAH M, CHAUDHARY V. Flow modeling and simulation study of vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process: A review[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering，2020，872(1)：012087.

[10] 马彦旭, 王继辉, 倪爱清, 等. 大厚度复合材料曲面典型构件的工艺优化[J]. 复合材料学报, 2021, 38(10): 3302-3313.
MA Yanxu, WANG Jihui, NI Aiqing, et al. Process optimization of typical components with large thickness composite curved surface[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021,

38(10): 3302-3313(in Chinese).

[11] 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 resin transfer molding process for stitched sandwich structure composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12): 3342-3349(in Chinese).

[12] ZHAO C H, ZHANG G C, WU Y B. Resin flow behavior simulation of grooved foam sandwich composites with the vacuum assisted resin infusion (VARI) molding process[J]. Materials, 2012, 5(12): 1285-1296.

[13] HALIMI F, GOLZAR M, ASADI P, et al. Core modifications of sandwich panels fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding[J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(15): 1853-1863.

[14] PETRESCUE L. An investigation of defect evolution in foam core sandwich structures produced using vacuum assisted resin transfer molding[D]. Ottawa: University of Ottawa, 2007.

[15] 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. Simulation and verification of resin filling for stitched foam sandwich composite VARTM process[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2015, 31(11): 124-129(in Chinese).

[16] 魏俊伟, 张兴刚, 郭万涛. 典型夹芯结构复合材料VARI工艺成型仿真计算研究[J]. 材料开发与应用, 2013, 28(5): 71-78.
WEI Junwei, ZHANG Xinggang, GUO Wantao. Simulation calculation of VARI process for typical sandwich structure composites[J]. Development and Application of Materials, 2013, 28(5): 71-78(in Chinese).

[17] 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.

[18] POODTS E, MINAK G, DOLCINI E, et al. FE analysis and production experience of a sandwich structure component manufactured by means of vacuum assisted resin infusion process[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 53(10): 179-186.

[19] FALASCHETTI M P, RONDINA F, ZAVATTA N, et al. Material characterization for reliable resin transfer molding process simulation[J]. Journal of Applied Sciences, 2020, 10(5): 1814.

[20] 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.

[21] 刘金良, 吴晓青. RTM工艺中树脂流动管道的优化设计[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008(6): 41-43.
LIU Jinliang, WU Xiaoqing. Optimal design of resin flow pipeline in RTM process[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2008(6): 41-43(in Chinese).

[22] 徐绍良, 岳湘安, 侯吉瑞, 等. 边界层流体对低渗透油藏渗流特性的影响[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007, 22(2): 26-28.
XU Shaoliang, YUE Xiang'an, HOU Jirui, et al. Effect of boundary layer fluid on seepage characteristics of low permeability reservoir[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2007, 22(2): 26-28(in Chinese).

[23] PORTO T N, BARBOSAD L A G, DE AMORIM JÚNIOR W F. Multiphase fluid flow in porous-fibrous media: Fundamentals, mathematical modeling and applications on polymeric composites manufacturing[J]. Diffusion Foundations, 2018, 20: 55-77.

[24] 张浩, 李书欣, 王继辉, 等. 基于新型测试装置的网孔板层开孔率对纤维厚度方向渗透率的影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37(5): 1175-1183.
ZHANG Hao, LI Shuxin, WANG Jihui, et al. Influence of ratio of hole area for mesh plate layer on through-thickness permeability based on a new designed test bench[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(5): 1175-1183(in Chinese).

[25] 杨旭静, 王跃飞, 韦凯, 等. 基于孔隙控制的车身结构树脂传递模塑成型工艺设计[J]. 复合材料学报, 2017, 34(5): 970-977.
YANG Xujing, WANG Yuefei, WEI Kai, et al. Process design of resin transfer molding for body structure based on pore control[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(5): 970-977(in Chinese).

[26] LABAT L, BREARD J, PILUT L S. Void formation prevision in LCM parts[J]. European Physical Journal Applied Physics, 2001, 16(2): 157-164.

[27] PATEL N, LEE L J. Modeling of void formation in liquid composite molding. Part I: Wettability analysis[J]. Polymer Composites, 1996, 17(1): 96-103.

[28] PATEL N, LEE L J. Modeling of void formation in liquid composite molding. Part II: Model development and impregnation[J]. Polymer Composites, 1996, 17(1): 104-114.

[29] 中国国家标准化管理委员会. 碳纤维增强塑料孔隙含量和纤维体积含量试验方法: GB/T 3365—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Carbon fiber reinforced plastics-Determination of void content and fiber volume content: GB/T 3365—

2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008(in Chinese).

[30] 戴福洪, 张博明, 杜善义, 等. RTM工艺注模过程模拟的有限元/控制体积方法和流动分析网络技术比较[J]. 复合材料学报, 2004, 21(2)：92-98.
DAI Fuhong, ZHANG Boming, DU Shanyi, et al. Comparison of finite element/control volume method and flow analysis network technology for injection molding process simulation of RTM process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2004，21(2)：92-98(in Chinese).

[31] 詹明樊, 王继辉, 倪爱清, 等. 基于数字图像技术的纤维织物面内渗透率表征[J]. 复合材料学报, 2021, 38(12)：4180-4209.
ZHAN Mingfan, WANG Jihui, NI Aiqing, et al. In-plane permeability characterization of fiber fabric based on digital image technology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2021，38(12)：4180-4209(in Chinese).

[32] 秦贞明, 陈以蔚, 李树虎, 等. 复合材料夹芯泡沫开孔对树脂充模的影响分析[J]. 材料工程, 2009(S2)：141-146.
QIN Zhenming, CHEN Yiwei, LI Shuhu, et al. Influence of composite foam core opening on resin filling process[J]. Journal of Materials Engineering，2009(S2)：141-146(in Chinese).

[33] 肖飞, 姜茂川, 刘强, 等. 复合材料副翼典型结构件的 VARI 工艺模拟及试验验证[J]. 航空材料学报, 2015, 35(3)：69-76.
XIAO Fei, JIANG Maochuan, LIU Qiang, et al. Vari process simulation and experimental verification of typical structural parts of composite aileron[J]. Journal of Aeronautical Materials，2015，35(3)：69-76(in Chinese).

[34] SHEN Y, GUO Z W, FENG Y Q, et al. Ultrasonic estimation of porosity in composite materials using acoustic attenuation[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring，2019，61(6)：310-315.