

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.03.013

基于PAM-RTM的CFRP平板RTM工艺及孔隙缺陷仿真

邹文涛¹, 孟宪明², 程从前¹, 宋通², 张赛², 曹铁山¹, 吴昊^{1,2}, 赵杰¹

(1.大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁大连 116024; 2.中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300162)

摘要: 树脂传递模塑(RTM)成型过程中不同工艺参数对碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)构件质量和性能有极大影响。为了精准设计RTM成型参数,降低最终构件的孔隙缺陷含量,分析充模过程中两种尺度孔隙率的变化及在构件中的分布规律,基于PAM-RTM软件对CFRP平板模型RTM成型的充模及双尺度孔隙形成进行了仿真模拟。分析了不同树脂黏度、浇注压力对填充时间及宏观和微观孔隙分布、孔隙率的影响规律;在构件中选取了不同位置的横向轴线并对比轴上宏观/微观孔隙的含量及分布特征,分析随着距离浇注口位置变化孔隙率的变化规律。结果表明,在恒压浇注条件下,浇注压力越大,树脂黏度越小,填充时间越短;树脂黏度为0.1 Pa·s、浇注压力为1.5 MPa时,充模时间最小,为13.11 s。宏观孔隙率随浇注压力升高而减小,微观孔隙率则相反。宏观孔隙在开始填充一段时间后形成,孔隙率最终在出胶口达到最大值;微观孔隙则在填充初始阶段开始形成,孔隙率随着填充距离增加逐渐减小。3条横向轴上两种尺度孔隙率的变化趋势相近;浇注压力影响宏观孔隙开始形成的位置及微观孔隙结束形成的位置,并影响填充结束时的最大宏观孔隙率和填充开始时的最大微观孔隙率。

关键词: 树脂传递模塑;双尺度孔隙模型;孔隙缺陷;PAM-RTM软件;仿真

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)03-0076-07

Simulation of RTM process and void defect for CFRP flat plate based on PAM-RTM

ZOU Wentao¹, MENG Xianming², CHENG Congqian¹, SONG Tong², ZHANG Sai², CAO Tieshan¹, WU Hao^{1,2}, ZHAO Jie¹

(1. School of Material Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300162, China)

Abstract : Different process parameters during resin transfer molding (RTM) molding have a great influence on the quality and performance of carbon fiber reinforced resin-based composite (CFRP) components. In order to accurately design the RTM molding parameters, reduce the void defect content of the final components, and analyze the changes of two-scale void content during the mold filling process and the distribution law in the components, the mold filling and two-scale void formation of CFRP flat plate model RTM molding were simulated based on PAM-RTM software. The influence of different resin viscosity and injection pressure on the filling time, macro and micro void distribution and content were analyzed. The transverse axes at different positions in the components were selected and the macro/micro void content was compared and characteristics on the axes to analyze the change rule of void content with the change of the position from the injection port were distributed. The results show that, under the condition of constant pressure injection, the higher the injection pressure, the lower the resin viscosity and the shorter the filling time; when the resin viscosity is 0.1 Pa·s and the injection pressure is 1.5 MPa, the mold filling time is the smallest, which is 13.11 s. The macro void content decreases with the increase of injection pressure, while the micro void content is the opposite. Macro void is formed after a period of time at the beginning of filling, and void content finally reaches the maximum value at the outlet. Micro void is formed at the initial stage of filling, and void content gradually decreases with the increase of filling distance. The trends of the two scales of void content on the three transverse axes are similar, the injection pressure affects the location of the beginning of the formation of macro void and the end of the formation of micro void, and affects the maximum macro void content at the end of filling, and the maximum micro void content at the beginning of filling.

Keywords : resin transfer molding ; double-scale void model ; void defect ; PAM-RTM software ; numerical simulation

基金项目: 政府间国际科技创新合作重点专项项目(2019YFE0124100)

通信作者: 赵杰,教授,主要从事材料强度与可靠性,结构损伤与仿真等方面研究

收稿日期: 2024-01-21

引用格式: 邹文涛,孟宪明,程从前,等.基于PAM-RTM的CFRP平板RTM工艺及孔隙缺陷仿真[J].工程塑料应用,2024,52(3):76-82.

ZOU Wentao, MENG Xianming, CHENG Congqian, et al. Simulation of RTM process and void defect for CFRP flat plate based on PAM-RTM[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3): 76-82.

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)因其具有高比强度、比刚度等优异力学性能,且能够实现汽车轻量化,并减少能源消耗和污染排放^[1-2],在轻量化领域被广泛研究。树脂传递模塑(RTM)工艺已发展为CFRP主要成型技术之一,其工艺成本低,效率高,可实现高性能复合材料的大批量生产^[3]。RTM成型是将低黏度树脂体系注入封闭模腔,排出残留空气并浸渍增强纤维最后固化的过程。然而,在RTM过程中,通常会出现以下3类制造缺陷:界面缺陷、纤维缺陷和基体缺陷^[4]。其中,孔隙是复合材料最常见的基体缺陷,孔隙含量对构件质量有很大影响^[5-6]。RTM中常用孔隙分析模型为双尺度模型,即纤维增强体是具有纤维束间及束内两种尺度间隙的多孔介质^[7]。研究表明,树脂流速会影响RTM成型CFRP构件最终两种尺度孔隙的形成和分布^[8-9]。

Labat等^[10]最先提出孔隙双尺度模型,重点研究了复合材料构件注射压力和孔隙率之间的关系,建立了一种求解稳态流体流动方程算法,结合实验验证了模型可靠性。Lystrup等^[11]阐述了一种碳纤维增强材料填充成型的光学孔隙测量方法,利用荧光染料和数码相机来产生足够的对比度和分辨率,由此得出的数据确定了最小宏观孔隙形成的树脂最低流速。Park等^[12]对宏观/微观孔隙的形成、流动前沿的气泡压缩及迁移进行了仿真模拟,验证了孔隙形成与毛细管数相关。Aaboud等^[13-14]考虑了纤维束的非均匀渗透性,分析了填充宏观、微观孔隙所需时间以推断孔隙产生和演化。Facciotto等^[15]通过多尺度方法预测复合材料中孔隙的位置,对双尺度多孔介质填充过程进行了建模和有限元仿真。此外,现阶段RTM成型大多为闭模成型,填充时难以观察树脂浸润纤维增强体的流动状态并预测缺陷的形成及分布,尤其是形状复杂、尺寸精度高的构件^[16]。因此,当前关于RTM成型的研究主要通过数值模拟的方法。Yan等^[17]以开孔泡沫夹层纤维扰流板为例,基于PAM-RTM研究了几种导流介质和浇注方案对孔隙形成的影响。PAM-RTM是针对复合材料液态成型过程的仿真软件,能降低缺陷风险,利于掌握制造过程。模拟采用达西(Darcy)定律求解,操作简便,计算精度高^[18]。

从目前的相关研究文献来看,对于两种尺度的形成过程以树脂浸润纤维机理居多,而对于具体的

CFRP构件在RTM成型工艺下,不同工艺变量对两种尺度孔隙缺陷的孔隙率及分布规律的影响研究较少。笔者基于PAM-RTM软件,建立孔隙双尺度模型,模拟了不同树脂黏度、浇注压力条件下的填充过程,同时对树脂流动及孔隙分布进行可视化模拟,探究了树脂体系黏度、浇注压力对填充时间及双尺度孔隙率的影响;分析了两种尺度的孔隙在不同浇注压力下的分布规律;在构件模型中选取横向轴,统计轴线上点的孔隙率结果,对比了宏观/微观孔隙的分布及孔隙率变化规律。

1 RTM理论模型

树脂浸润纤维增强体过程可描述为牛顿流体在多孔介质中渗流^[19-21]。可用Darcy定律进行描述:

$$\vec{u} = -\frac{K}{\mu} \cdot \nabla P \quad (1)$$

式中: $\vec{u}$ —树脂流动速度矢量,m/s;

μ —树脂黏度,Pa·s;

K —双尺度多孔介质渗透率张量,m²;

P —流体压强,Pa。

Darcy定律提供了一种简化的流动模型,用体积平均的概念代替了直接描述树脂填充多孔介质复杂的微观流动。

树脂浸润纤维介质过程中,驱动力来自束间的黏性力和束内的毛细管力,两种力不断变化产生不均匀流动前沿包裹空气,导致填充阶段产生宏观/微观孔隙^[22-23]。双尺度孔隙形成过程如图1所示。

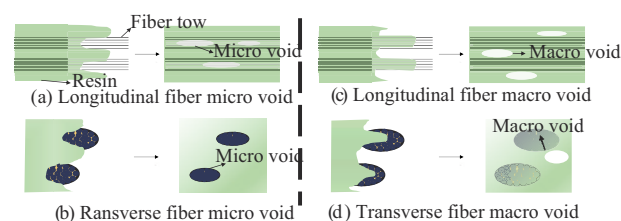


图1 双尺度孔隙形成过程

Fig. 1 Two-scale void formation process

以前的研究表明,微观和宏观孔隙的形成与无量纲数—毛细管数(N_{ca})有关。Gommer等^[9]提出了一种考虑液/纤维接触角和流体表面张力的 N_{ca} 其计算公式列于式(2):

$$N_{ca} = \frac{\mu v}{\gamma \cos \theta} \quad (2)$$

式中: v —树脂表面流速;

μ —树脂黏度;

γ —纤维表面张力;

θ —树脂与纤维间的接触角。

(3) Labat 等^[10]测量了大量树脂浸渍增强纤维的孔隙率,与流体流速建立了联系,拟合曲线,表明双尺度孔隙率的变化与树脂的毛细管数成对数关系:

$$V_M = -A - B \lg(N_{Ca}) \tag{3}$$

$$V_m = A' + B' \lg(N_{Ca}) \tag{4}$$

式中: V_M —宏观孔隙含量;

V_m —微观孔隙含量;

A, B, A', B' —对数关系中的系数。

因式(2)中描述了 N_{Ca} 与树脂流速成正比的关系,表明宏观或微观孔隙的形成与树脂流速也有关系。

2 建模与仿真计算

2.1 几何模型及材料参数

通过 Visual-Mesh 建立碳纤维预成型体平板模型,模型尺寸设置为 500 mm×250 mm×5 mm。为保证模拟精度,采用三角形网格进行划分,网格尺寸相对较小,共计 11 756 个单元,6 029 个节点。导入 HEXCEL-G0986 型斜纹碳纤维渗透率参数,并定义

材料方向,模型如图 2 所示。

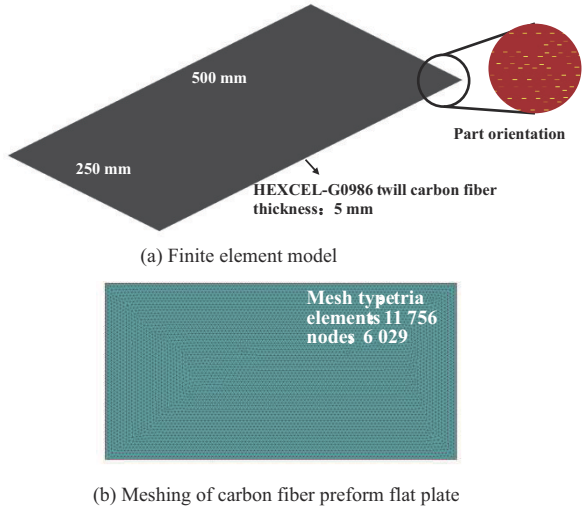


图 2 碳纤维预成型体平板有限元模型及网格划分

Fig. 2 Finite element model and meshing of carbon fiber preform flat plate

将划分网格后的模型导入到 PAM-RTM,进行模拟。相关参数列于表 1。

表 1 材料及工艺基本参数

Tab. 1 Basic parameters of materials and process

Material and process	Values of parameters
Resin (LY3585)	Viscosity is 0.1–0.7 Pa·s Density is 1 000 kg/m ³
Reinforcement fiber (HEXCEL-G0986)	$K_x=3.232 \times 10^{-10} \text{ m}^2$; $K_y=1.72 \times 10^{-10} \text{ m}^2$; $K_z=1.72 \times 10^{-10} \text{ m}^2$; $T=5 \text{ mm}$; $V_f=50 \%$
Filling Process	Injection pressure is 0.1~1.5 MPa Injection temperature is 300 K

Notes: K_x, K_y is fiber in-plane permeability; K_z is vertical fiber permeability; T is fiber cloth thickness; V_f is fiber content.

2.2 浇注方案设计

为了探究 RTM 成型工艺填充过程中双尺度孔隙形成及分布情况,带入亨斯曼环氧树脂 LY3585 的孔隙模型参数值:

$$V_M = -16.28 - 11.8 \lg(N_{Ca}) \tag{6}$$

$$V_m = 3.16 + 2.35 \lg(N_{Ca}) \tag{7}$$

用于填充和孔隙模拟的线浇注方案见图 3。



图 3 线浇注方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of line injection program

图 4 为采用边线浇注在不同时刻的树脂流动前沿图,可知这种浇注方案的流动前沿较为平整,填充效果较好,不易产生面积较大的缺胶区域及干

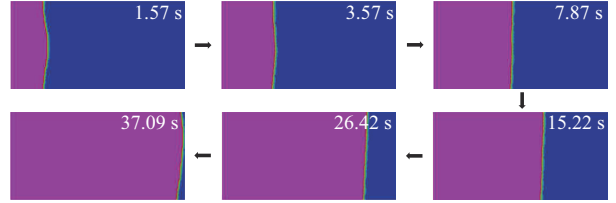


图 4 黏度为 0.3 Pa·s、压力为 1.5 MPa 时的填充过程

Fig. 4 Filling process at 0.3 Pa·s of viscosity and 1.5 MPa of pressure

斑,且能够缩短填充时间,便于对后续的双尺度孔隙特征进行分析。

3 结果与讨论

3.1 典型工艺参数的影响

分别设置树脂黏度为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 Pa·s, 浇注压力为 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 MPa, 共 16 组模拟参数。表 2 为 0.1 MPa 下不同树脂黏度的填充时间和最大双尺度孔隙率的结果。由表 2 可知,当黏度为 0.7 Pa·s、浇注压力为 0.1 MPa 时填充时间最长,为

1381.8 s;黏度为0.1 Pa·s,浇注压力为1.5 MPa时填充时间最短,为13.11 s。树脂黏度主要影响填充时间,对孔隙率结果影响较小,最大宏观孔隙率在14.04%~14.20%范围内变化,而最大微观孔隙率基本保持2.31%不变。

表2 0.1 MPa下不同树脂黏度模拟结果

Tab. 2 Simulation results of different resin viscosities at 0.1 MPa

Program	Resin viscosity/(Pa·s)	Filling time/s	Maximum macro void content/%	Maximum micro void content/%
A1	0.1	196.2	14.20	2.31
B1	0.3	591.3	14.04	2.31
C1	0.5	983.9	14.07	2.31
D1	0.7	1 381.8	14.04	2.31

图5为填充时间及树脂黏度为0.3 Pa·s时孔隙

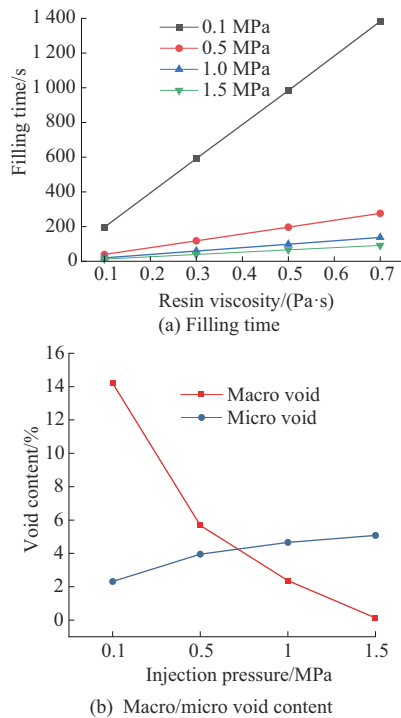


图5 填充时间随树脂黏度及浇注压力变化及树脂黏度为0.3 Pa·s,宏观/微观孔隙率随浇注压力变化

Fig. 5 Variation of filling time with resin viscosity and injection pressure, and variation of macro/micro void with injection pressure at 0.3 Pa·s of resin viscosity

率随浇注压力的变化情况。由图5a可知,随着树脂黏度的增加,树脂流动性降低,浸润纤维的速率减慢,RTM填充时间增加,两者呈线性关系。而随着浇注压力的递增,树脂在纤维中浸润的动力增大,树脂流动前沿速率提高,从而降低填充时间。当浇注压力由0.1 MPa增大到0.5 MPa时,填充时间显著下降,而在同样梯度的压力增量下,填充时间下降的程度有减小的趋势。

图5b表明,对于RTM成型复合材料中的孔隙率,树脂注入时的压力也是一个重要的影响因素。压力增加会降低宏观孔隙率,同时使微观孔隙率上升。压力较小时,树脂流动缓慢,纤维束内的毛细作用力强于纤维束间的压力驱动力,从而导致树脂在束内流速较大,不均匀流动前沿中流动前锋位置汇合,包裹空气,从而来不及填充的区域产生宏观孔隙。反之则产生微观孔隙。浇注压力为0.1 MPa时,微观孔隙率最小,孔隙率为2.309 0%;当浇注压力为1.5 MPa时,宏观孔隙率最小为0.129 9%。

3.2 孔隙分布结果分析

由上述结果可知,浇注压力对两种尺度的最大孔隙率有较大影响,可进一步分析不同浇注压力对孔隙分布结果的影响。浇注压力会显著影响孔隙区域开始出现的位置,选取黏度为0.3 Pa·s,对不同浇注压力下的孔隙分布云图进行分析,宏观孔隙分布云图见图6。

由图6可知,当浇注压力为0.1,0.5,1.0 MPa时,在浇注口附近不存在宏观孔隙,而在出胶口位置出现宏观孔隙富集区域。这是因为树脂填充的初始时刻压力为最大值,此时树脂浸润纤维的驱动力为纤维束间的黏性力,受浇注压力主导,从而导致束间的树脂流动速率较束内高,束内浸润缓慢区域产生微观孔隙,而不会产生宏观孔隙。随着压力在填充过程中逐渐衰减,总体树脂流速缓慢,直至出胶口位置达到最低水平,纤维束内的毛细管力逐渐成为主要的浸润驱动力,此时束间流速小于束内流速,从而产生更多宏观孔隙,使得宏观孔隙在整个构件中呈梯度分布。当浇注压力为1.5 MPa时,树脂流速过快,构件中几乎不产生宏观孔隙。随着浇注压力从0.1 MPa升高至1.5 MPa,宏观孔隙开始出现的位置向出胶口方向后移,孔隙区域面积随着压力增大而减小,且宏观孔隙率最大值也逐渐降低,压力为0.1 MPa时最大值为14.04%,而压力为1.5 MPa时,宏观孔隙最大值仅为0.18%。

对于微观孔隙,其不同浇注压力下的分布图如图7所示。由图7可知,微观孔隙与宏观孔隙的分布规律相反,浇注口附近出现微观孔隙富集区域,而出胶口附近不存在微观孔隙。随着浇注压力的升高,微观孔隙结束形成的位置向出胶口方向后移,区域面积逐渐增大,微观孔隙最大值由2.309%增大至5.073%。其孔隙率最高水平区域始终在浇

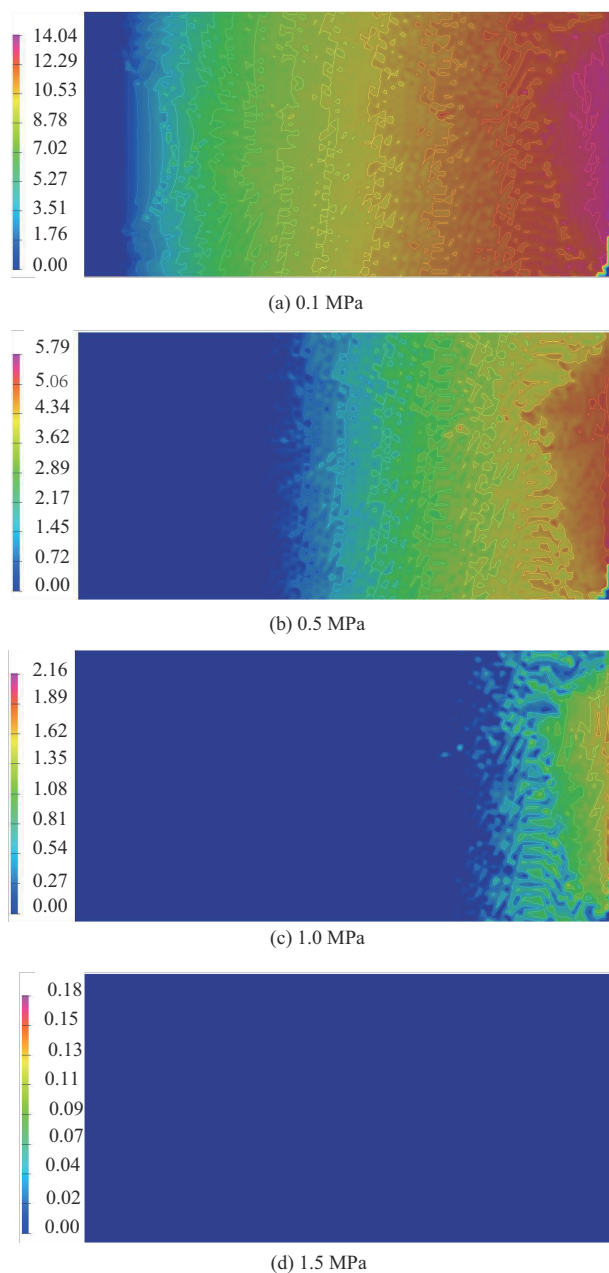


图6 不同浇注压力下的宏观孔隙分布云图

Fig. 6 Macro void distribution cloud under different injection pressures

注口附近,而孔隙率较低水平区域随着压力增大向后延伸。以左端线性浇注口中点为坐标原点,表3给出了两种尺度的孔隙区域开始形成和结束形成的位置。对于宏观孔隙,当浇注压力为0.1 MPa时,距离左端线注胶口36 mm处开始形成;随着浇注压力增大,开始形成位置向后推移,当浇注压力为1.5 MPa时,在496 mm靠近出胶口位置开始形成,各压力下的宏观孔隙都在500 mm线出胶口处结束形成。对于微观孔隙,在各压力下都从左端线浇注口开始形成。当浇注压力为0.1 MPa时,在29 mm处

结束形成;随着浇注压力增大,微观孔隙结束形成位置向后推移,当压力为1.5 MPa时,结束形成位置为距左端浇注口480 mm处。

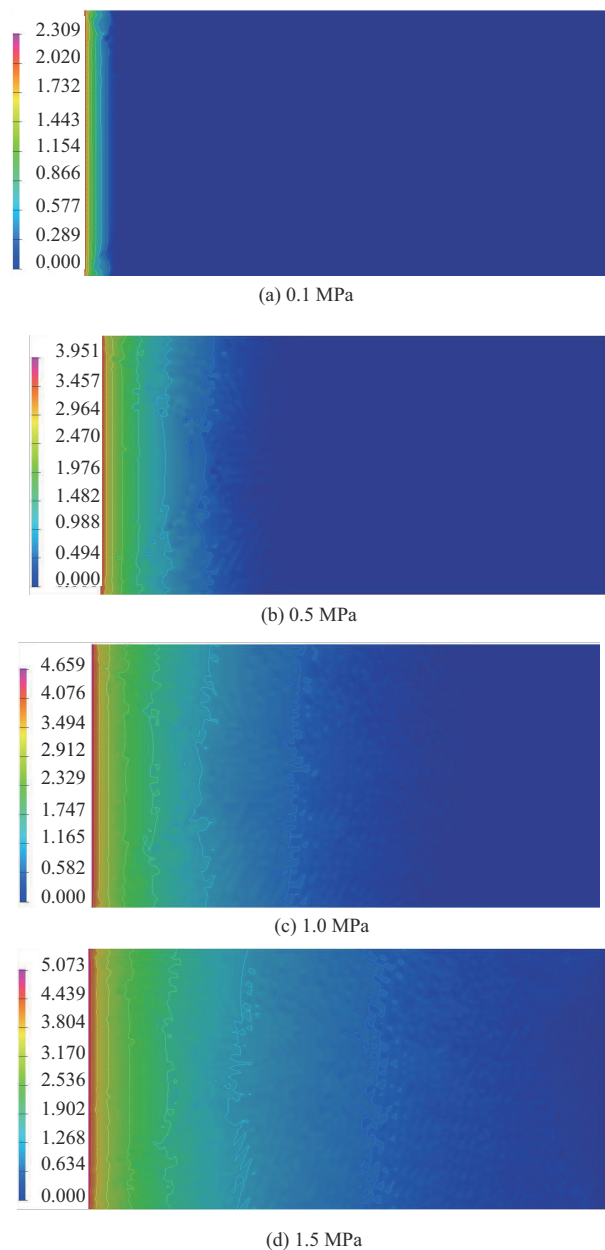


图7 不同浇注压力下的微观孔隙分布云图

Fig. 7 Micro void distribution cloud under different injection pressures

表3 不同浇注压力下两种尺度孔隙位置

Tab. 3 Positions of voids with two scales under different injection pressures

Location of void occurrence	Injection pressure levels/MPa			
	0.1	0.5	1.0	1.5
Macro void formation location/mm	36	182	339	496
Macro void end formation location/mm	500	500	500	500
Micro void formation location/mm	0	0	0	0
Micro void end formation location/mm	29	165	350	480

为了进一步研究两种尺度的孔隙率随着距离浇注口位置增大的变化情况,选取图8中所示的三条横向轴线。中轴为构件的横向对称轴,将其上移60 mm和下移60 mm得到另外两条横向轴,统计轴线上点的双尺度孔隙率结果。

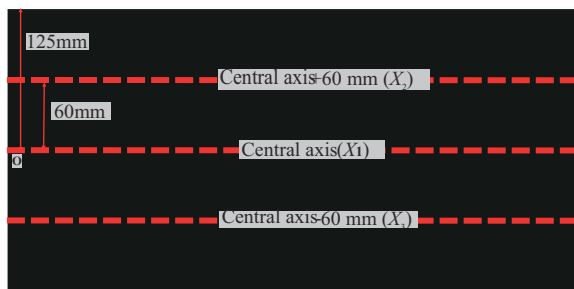
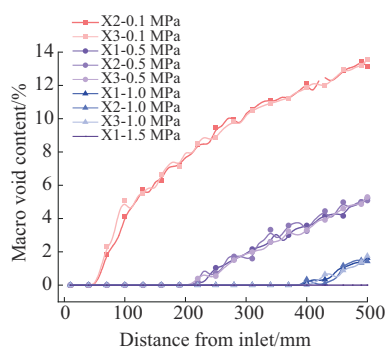


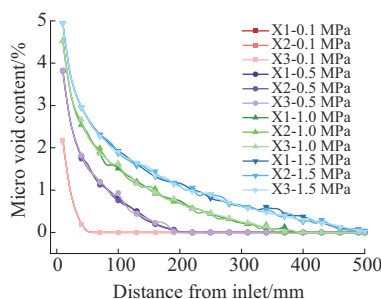
图8 分析孔隙率分布的横向轴

Fig. 8 Transverse axis for analyzing void distribution

图9为横向轴上宏观、微观孔隙率随距离变化情况。由图9a可知,除1.5 MPa时横向中轴上的宏



(a) Macro void



(b) Micro void

图9 横向轴上宏观、微观孔隙率随距离变化情况

Fig. 9 Variation of macro void and micro void with distance on transverse axis

观孔隙率为0%外,其余浇注压力的孔隙率总体变化趋势都是逐渐增大的,且距离浇注口同一长度但不同纵向位置的宏观孔隙率并不相同,其值在一定的范围内波动,存在较小的差异,但三条轴线总体都符合增大趋势:当浇注压力为0.1 MPa时,在出胶口即距离浇注口500 mm位置上,中轴(X_1)的宏观孔

隙率为13.47%;中轴上移60 mm (X_2)为13.15%;中轴下移60 mm (X_3)为13.55%。而在其他压力条件下3个位置的宏观孔隙率也存在这样的波动,但3条轴线开始形成孔隙的位置都相同。树脂在填充结束后所形成的宏观孔隙并非严格的梯度增长,图中几条曲线都存在后填充位置比已经填充结束位置的宏观孔隙率较小的现象,如浇注压力为0.5 MPa时,取 X_1 轴上的点,距浇注口350 mm处宏观孔隙率为3.292%,但360 mm处的孔隙率却下降至2.474%,到370 mm才升高至3.009%,可见宏观孔隙率的变化并非随距离增大而严格升高。由图9a同样可以得到浇注压力影响宏观孔隙开始形成的位置,并影响填充结束的最大宏观孔隙率这一结论。

由图9b可知,微观孔隙率的总体变化趋势与宏观孔隙率相反,在浇注口处为最大值,随距离浇注口位置增大而减小,最终减小为0。与宏观孔隙不同,当浇注压力升高至1.5 MPa时构件中几乎不产生宏观孔隙,但微观孔隙聚集在浇注口附近,在4种浇注压力下构件中始终存在微观孔隙。三条横向轴的微观孔隙率结果比宏观孔隙吻合较好,说明其分布较宏观孔隙更加均匀,且初始位置的微观孔隙率在三个横向轴上的值都相同。同样,微观孔隙的变化并非严格随距离浇注口位置增大而减小,如浇注压力为1.5 MPa时,取中轴(X_1)上的点,距浇注口330 mm处微观孔隙率为0.52%,但340 mm处的孔隙率升高至0.606%,可见微观孔隙率的变化并非随距离增大而严格降低。由图9b同样可以得到浇注压力影响微观孔隙结束形成的位置,并影响填充开始时的最大微观孔隙率这一结论。

4 结论

(1)树脂黏度增大,浇注压力较小时,树脂流动缓慢,浸润纤维速率减慢,增大了RTM成型工艺周期。当黏度为0.7 Pa·s、浇注压力为0.1 MPa时填充时间最长,为1381.8 s;黏度为0.1 Pa·s,浇注压力为1.5 MPa时填充时间最短,为13.11 s。浇注压力影响树脂流速,又影响孔隙率及其孔隙分布。当浇注压力增大,宏观孔隙率减小,微观孔隙率增大。黏度改变但浇注压力不变对宏观孔隙率的最大值影响较小,微观孔隙率最大值基本不变。

(2)两种尺度的孔隙在构件中的分布规律相反,宏观孔隙在填充一段时间后开始产生,浇注口附近不存在宏观孔隙,然后孔隙率呈梯度增加,最终在出胶口位置达到最大值;微观孔隙在填充初始阶段开始产生,孔隙率在浇注口附近为最大值,之后随着距离浇注口位置增大逐渐减小。

(3)浇注压力影响宏观孔隙开始形成的位置和宏观孔隙率,随着压力增大,宏观孔隙区域面积减小,其开始形成的位置向出胶口移动,当压力达到1.5 MPa时构件中几乎不存在宏观孔隙;相反,浇注压力影响微观孔隙结束形成的位置及微观孔隙率,随着压力增大,微观孔隙区域面积增大,其结束形成的位置向出胶口移动。轴线上距离浇注口同一长度但不同纵向位置的宏观、微观孔隙率并不相同,存在较小的差异,但三条轴线上的双尺度孔隙率总体都符合增大或减小趋势,且微观孔隙分布较宏观孔隙更加均匀。

参考文献

- [1] 周菁.碳纤维增强复合材料性能研究[J].现代工业经济和信息化,2022,12(1):234-235.
ZHOU Jing. Research on the properties of carbon fiber reinforced composites[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2022, 12(1):234-235.
- [2] 康元春,刘俊峰,孟紫薇.碳纤维复合材料电池箱轻量化研究[J].复合材料科学与工程,2022(5):66-70.
KANG Yuanchun, LIU Junfeng, MENG Ziwei. Study on light-weight of carbon fiber composite battery box[J]. Composites Science and Engineering, 2022(5):66-70.
- [3] TROFIMOV A, RAVEY C, DROZ N, et al. A review on the representative volume element-based multi-scale simulation of 3D woven high performance thermoset composites manufactured using resin transfer molding process[J]. Composites Part A: Applied Science and anufacturing, 2023, 169. DOI: 10.1016/j.compositesa.2023.107499.
- [4] 肖昌伟,李文晓.树脂传递模塑成型工艺复合材料孔隙表征和孔隙形成预测研究进展[J].材料导报,2022,36(23):244-250.
XIAO Changwei, LI Wenxiao. Research progress of void characterization and filling-induced void prediction of RTM-prepared composites[J]. Materials Reports, 2022, 36(23):244-250.
- [5] FU Y T, YAO X F, GAO X H. Micro-Mesoscopic prediction of void defect in 3D braided composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 147(11). DOI:10.1016/j.compositesa.2021.106450.
- [6] BALAKRISHNAN V S, SEIDLITZ H. Potential repair techniques for automotive composites: A review[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 145:28-38.
- [7] MEHDIKHANI M, GORBATIKH L, VERPOEST I, et al. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 53(12). DOI: 10.1177/0021998318772152.
- [8] JIANG W, HUANG Z, WANG Y, et al. Voids formation and their effects on mechanical properties in thermoformed carbon fiber fabric-reinforced composites[J]. Polymer Composites, 2019. DOI: 10.1002/pc.24876.
- [9] GOMMER F, ENDRUWEIT A, LONG A C. Influence of the micro-structure on saturated transverse flow in fibre arrays[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 52(18). DOI: 10.1177/0021998317747954.
- [10] LABAT L, BRÉARD J, PILLUT-LESAYRE S, et al. Void fraction prevision in LCM parts[J]. The European Physical Journal-Applied Physics, 2001, 16(2):157-164.
- [11] LYSTRUP C, GEORGE A, ZOBELL B, et al. Optical measurement of voids in situ during infusion of carbon reinforcements[J]. Journal of Composite Materials, 2021, 55(6):775-786.
- [12] PARK C H, AURÉLIE L, SAOUAB A, et al. Modeling and simulation of voids and saturation in liquid composite molding processes[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(6):658-668.
- [13] AABOUD B, SAOUAB A, NAWAB Y. Simulation of air bubble's creation, compression, and transport phenomena in resin transfer moulding[J]. Journal of Composite Materials, 2017, 51(29):4 115-4 127.
- [14] AABOUD B, BIZET L, SAOUAB A, et al. Effect of the spatial variation of permeability on air bubble creation and compression [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2020, 39(7-8): 285-298.
- [15] FACCIOITTO S, SIMACEK P, ADVANI S G, et al. Modeling formation and evolution of voids in unsaturated dual scale preforms in resin transfer molding processes[J]. Composites-Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 173: 107 674 - 107 675.
- [16] CAUSSE P, RAVEY C, TROCHU F. Capillary characterization of fibrous reinforcement and optimization of injection strategy in resin transfer molding[J]. Journal of Composites Science, 2018, 2 (2).DOI:10.3390/jcs2020019.
- [17] YAN C, WU H, REN X, et al. Experimental and numerical study on the permeation behavior of foam-core sandwich panels in LCM [J]. Fibers and Polymers, 2021, 22(9):2 612-2 625.
- [18] 陈星宇,王遵,卜继玲,等.碳纤维叶片大梁真空灌注工艺仿真和验证[J].复合材料科学与工程,2020(7):109-110.
CHEN Xingyu, WANG Zun, BU Jiling, et al. Process simulation and verification of carbon spar cap by VARTM process[J]. Composites Science and Engineering, 2020(7):109-110.
- [19] TEIXIDÓ H, STAAL J, ÇAĞLAR B, et al. Capillary effects in fiber reinforced polymer composite processing: A review[J]. Frontiers in Materials, 2022, 9. DOI:10.3389/fmats.2022.809226.
- [20] WILLENBACHER B, MAY D, MITSCHANG P. Out-of-plane capillary pressure of technical textiles[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 124(C). DOI:10.1016/j.compositesa.2019.105495.
- [21] LI C, Cantarel A, GONG X. A study on resin infusion and effects of reinforcement structure at dual scales by a quasi-realistic numerical simulation method[J]. Journal of Composite Materials, 2020, 54(27):4 157-4 171.
- [22] WU D, Larsson R. A shell model for resin flow and preform deformation in thin-walled composite manufacturing processes[J]. International Journal of Material Forming, 2020, 13(6):923-937.
- [23] CARLONE P, RUBINO F, PARADISO V, et al. Multi-scale modeling and online monitoring of resin flow through dual-scale textiles in liquid composite molding processes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96: 2 215-2 230.