

文章编号: 1000-3851(2004)02-0161-07

RTM 工艺注模过程边缘效应模拟分析

戴福洪, 张博明, 杜善义

(哈尔滨工业大学 复合材料研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: RTM 工艺需将纤维预制体预置到模具中, 由于纤维预制体结构不均匀性和模具形状、尺寸等影响, 极易产生边缘效应。边缘效应会严重影响树脂流场发展和压力场分布。本文作者采用等效渗透系数方法模拟边缘效应, 得到了其影响下的树脂流动前峰曲线和压力场。研究表明: 一方面边缘效应可能导致不期望的树脂流场发展而形成工艺缺陷——干斑; 另一方面可以利用边缘效应提高工艺效率: 常流率注射时减小合模压力和注射压力, 常压力注射时可以减少注模时间。

关键词: 模拟; 边缘效应; RTM; 树脂

中图分类号: TB332; TB330.1; V258 文献标识码: A

SIMULATION ANALYSIS OF EDGE EFFECTS DURING MOULD FILLING IN RTM PROCESS

DAI Fuhong, ZHANG Boming, DU Shanyi

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In RTM, it needs pre-placing fibrous preform into the mold. It is most probable to create an edge effect, which offers injected resin paths of least resistance due to the variation of fibrous preform structure and the shape and dimension of the mold. The edge effect may drastically affect resin flow front advancement and the distribution of pressure fields. In this paper, simulations are carried out with the approach of equivalent permeability, and the resin flow front curve and pressure fields with flow channels are obtained. The studies demonstrate that on the one hand the edge effect may lead to the unwanted effect on resin flow fields to form defects—dry spot, on the other hand it may be used to enhance the mold filling process: reduction of mold and injection pressures at constant flow rate injection; shorter fill time at constant pressure injection.

Key words: simulation; edge effect; resin transfer molding (RTM); resin

RTM 工艺是在一定温度及压力下把低粘度的树脂注入预先置有增强纤维的模具中, 然后固化成型的一种复合材料成型方法, 属于复合材料的液体成型技术范畴。RTM 成型工艺流程包括五个阶段: 纤维预制体的制作, 纤维预制体铺设到模具中, 树脂注入(注模过程), 树脂固化(固化过程)和脱模。

树脂对纤维预制体的浸润效果是影响 RTM 工艺制品质量的重要因素, 而纤维预制体的渗透性能是影响注模过程中树脂对纤维预制体浸润效果的重

要因素。纤维预制体结构和形状变异会导致局部纤维体积分数较低或较高而形成树脂富区或贫区, 使成品均匀性差。纤维预制体结构变异原因大致有以下三个方面^[1~7]: 一是在预制体成型过程中由外界扰动引起; 二是预制体安装到模具中时, 为适应模具表面形状纤维预制体变形以及纤维预制体切断处与模具表面不能完全吻合而引起; 三是注模过程中树脂与预制体的相互作用引起, 如纤维冲刷(Fiber washing)引起纤维密度改变。

其中, 纤维预制体边缘与模具表面不能完全吻合, 该处容易形成空隙, 这种空隙即使很小也可以形成树脂流动的优先通道而严重影响树脂流动前峰发展, 这一现象称为边缘效应, 如图 1 所示^[3]。在多孔介质中, 树脂流动行为以 Darcy 定律来描述。在流动通道中, 树脂流动有两种方法来描述^[4]。第一种为等效渗透系数法, 该方法以等效渗透系数表示流动通道横截面内的树脂平均流速, 将流动通道作为具有这样渗透率的多孔介质来描述。第二种以 Navier-Stokes 方程来描述流动通道中的树脂流动, 在纤维预制体中以含有 Brinkmann 项的修正 Darcy 方程来描述, 流动通道和纤维预制体的界面间要求应力和速度连续。第二种方法的数学模型复杂, 在流动过程模拟中不便于应用。一般的注模过程模拟程序是基于多孔介质中的渗流模型来编制的^[9, 10], 这样采用第一种方法便于流动过程的模拟。

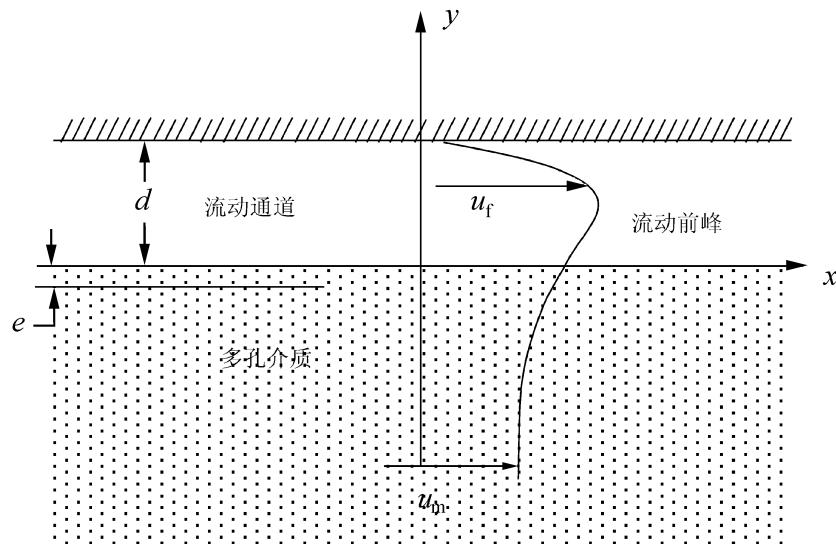


图 1 边缘效应示意图

Fig. 1 Illustration of edge effect

本文中采用等效渗透系数方法模拟在边缘效应作用下的树脂流动过程, 研究其对填充时间和压力场分布的影响。

1 数学模型

1.1 达西方程

树脂在纤维预制体中的流动常以达西定律来描述, 达西定律以张量形式表达为^[7]

$$\mathbf{u} = -\frac{\mathbf{K}}{\mu} \mathbf{P} \quad (1)$$

式中: \mathbf{u} 为体积平均的达西速度; \mathbf{K} 为渗透率张量; μ 为树脂粘度; \mathbf{P} 为压力梯度。

其中, 渗透率是流动过程模拟的关键参数, 它与纤维预制体结构和孔隙度有关。

壁构件, 忽略厚度方向的流动, 问题简化为二维的。二维达西定律的矩阵形式为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_x &= -\frac{1}{K_{xx}} K_{xx} \quad K_{xy} \quad dP/dx \\ \mathbf{u}_y &= -\frac{1}{K_{yy}} K_{yx} \quad K_{yy} \quad dP/dy \end{aligned} \quad (2)$$

式中: \mathbf{u}_x 和 \mathbf{u}_y 是达西速度。

1.2 等效渗透系数

用等效渗透系数的方法模拟存在流动通道的渗流过程得到广泛的应用^[3, 4, 7, 8]。在有限元模型中, 代表流动通道区域的单元渗透系数比代表预制体区域单元的渗透系数高很多, 以反映流动通道中树脂流动的阻力比较小。

对于图 1 所示的明确定义的流动通道, 可以考虑用流动通道中的稳态 Stokes 流动来预测等效渗透系数。得到稳态 Stokes 流动流率的解析解并与一维达西流动的表达式进行类比而得到等效渗透系数。如文献[3]通过求解简化的 Navier-Stokes 方程得到流动通道中树脂流速

$$\mathbf{u}_f = -\frac{P}{\mu} - \frac{1}{2} y^2 + \frac{d^2}{2(d+e)} y + \frac{e \cdot d^2}{2(d+e)} + \frac{u_m}{d+e} (d - y) \quad (3)$$

式中: \mathbf{u}_f 为流动通道中树脂流速; \mathbf{u}_m 为多孔介质中的树脂流速; d 为流动通道的宽度; e 为两种流动的过度区距离。这一过度区的距离 $e \approx 10^{-4.5} \text{ m}$ 相比于 $d \approx 10^{-3} \text{ m}$ 可以忽略掉, 进一步假设方程(3)中的 \mathbf{u}_m 的贡献可以忽略, 则方程(3)右边的后两项消失, 而成为

$$\mathbf{u}_f = -\frac{P}{\mu} - \frac{1}{2} y^2 + \frac{1}{2} y d \quad (4)$$

方程(4)与方程(1)比较, 可以得到等效渗透系数 K_c 为

$$K_c = \frac{1}{2} (yd - y^2) \quad (5)$$

对方程(5)沿宽度 d 积分并除以 d 则得到等效的平均渗透系数 K_{equ} 为

$$K_{equ} = \frac{d^2}{12} \quad (6)$$

1.3 横向流系数

文献[3]通过系统的研究指出方程(6)的模型与实验结果不能很好吻合, 他们认为这是由于横向流的影响, 如图 2 所示。他们还提出了用横向流系数来评价横向流的影响, 定义横向流系数为

$$Z = \frac{12K_y}{d^2} m \quad (7)$$

$$m = K_y / K_x \quad (8)$$

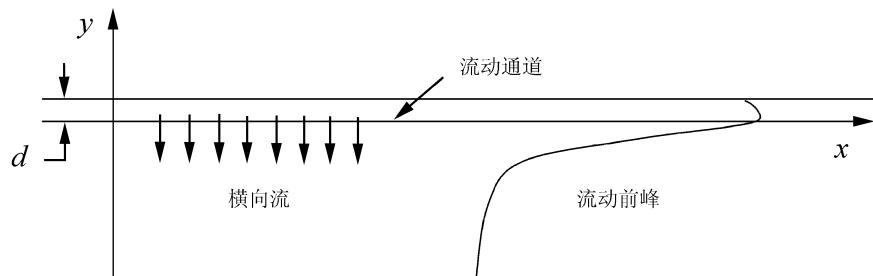


图 2 横向流示意图

Fig. 2 Illustration of transverse flow

式中: Z 为横向流系数; m 表示纤维预制体的各向异性程度。

2 算例研究

RTM 工艺注射方式多种多样, 如图 3 所示的线注射口和点注射口的方案。本文中主要研究这两种注射方案。

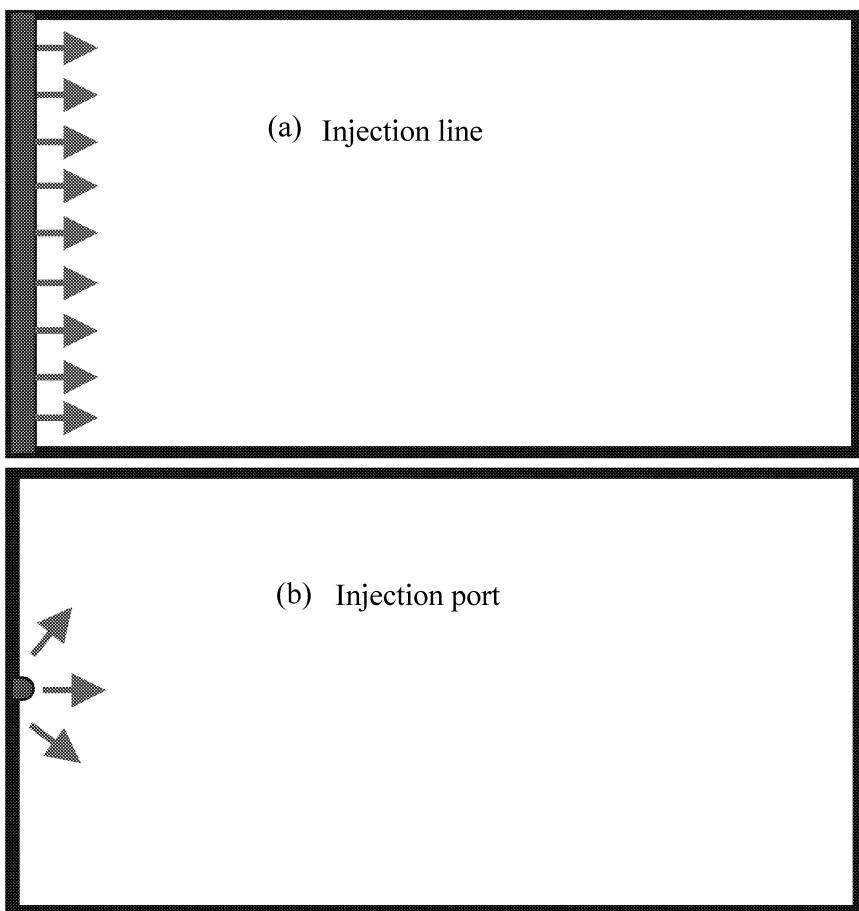


图 3 外边界线注射和点注射方案

Fig. 3 External injection line and port

2.1 线注射

线注射算例的几何模型为 $0.4 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}$ 的矩形板。孔隙度为 0.5, 树脂粘度为 $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。纤维预制体的渗透率为各向同性 $K_x = K_y = 4.56 \times 10^{-09} \text{ m}^2$ 。注射条件分别为常流率注射和常压力注射。注射流率 q_0 为 $2.1 \times 10^{-05} \text{ m}^3/\text{s}$, 注射压力 P_0 为 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。当考虑边缘效应时, 两侧边缘流动通道的宽度各为 2 mm, 排气口为右边界线。

2.1.1 常流率线注射

不考虑边缘效应时的树脂流场发展见图 4。考

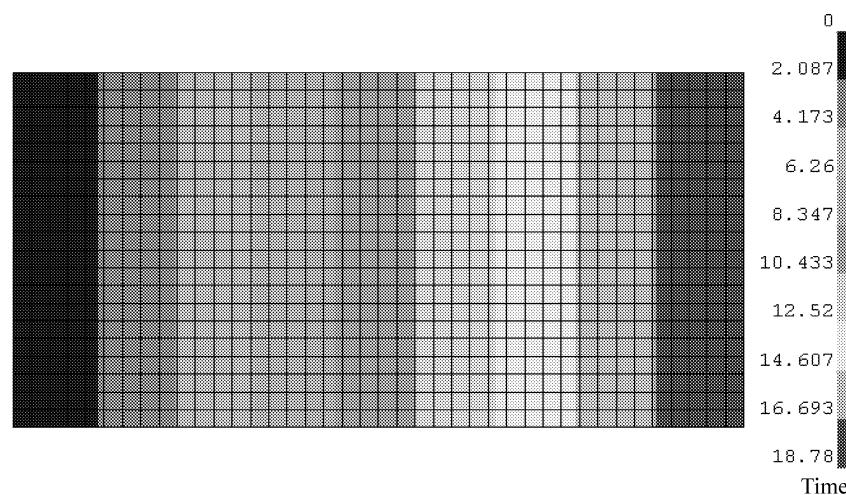


图 4 无边缘效应时不同时刻树脂

流动前峰(常流率线注射)

Fig. 4 Resin flow front without edge effect at different stages (constant flow rate line injection)

虑边缘效应时, 按照方程(6)得到等效渗透系数为 $3.33 \times 10^{-07} \text{ m}^2$ 。根据方程(7)得到横向流系数 Z 为 1.37。文献[3]指出横向流系数 Z 小于 0.5 时可以忽略横向流的影响, 而 Z 大于 0.5 时则应考虑横向流的作用。考虑横向流影响的树脂流场发展见图 5。当考察忽略横向流的影响时, 严格来说横向渗透系数应为 0, 而对于这样两个方向渗透系数比例严重失调的单元求解往往失真, 因此取流动通道的横向渗透系数为 K_y 的 $1/100$ 作为忽略横向流影响的近似, 其树脂流场发展见图 6。有无边缘效应时的注射口(左边界线中点)压力时间历程见图 7。

常流率线注射模拟结果分析:

(1) 有无边缘效应的比较: 从图 4 可以看到树脂流动前峰为直线, 从图 5 和图 6 可以看到在边缘效应影响下, 树脂流动前峰有马鞍形逐渐过度到呈抛物线形状。另外, 可以观察到在边缘效应影响下一些树脂较快流到右边界处, 而使一部分树脂溢出模具, 因此导致注模时间有所增加。从图 7 可以观察到

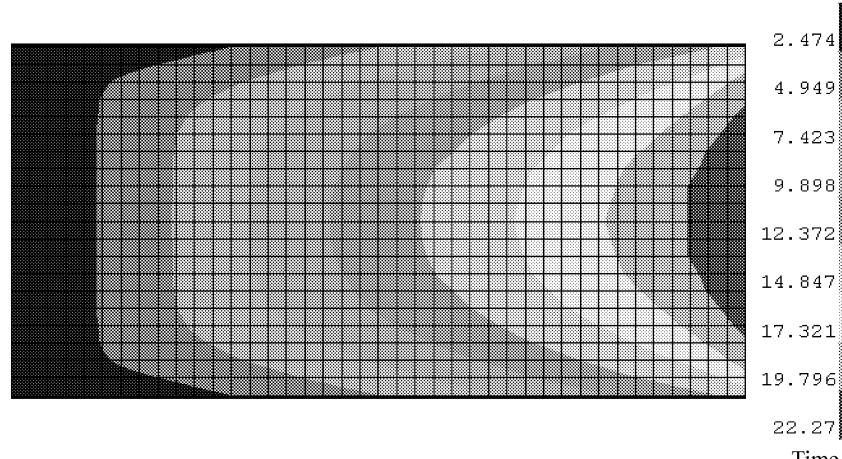
图 5 有边缘效应时不同时刻树脂流动前峰
(考虑横向流影响常流率线注射)

Fig. 5 Resin flow front with edge effect at different stages (constant flow rate line injection with transverse flow effect)

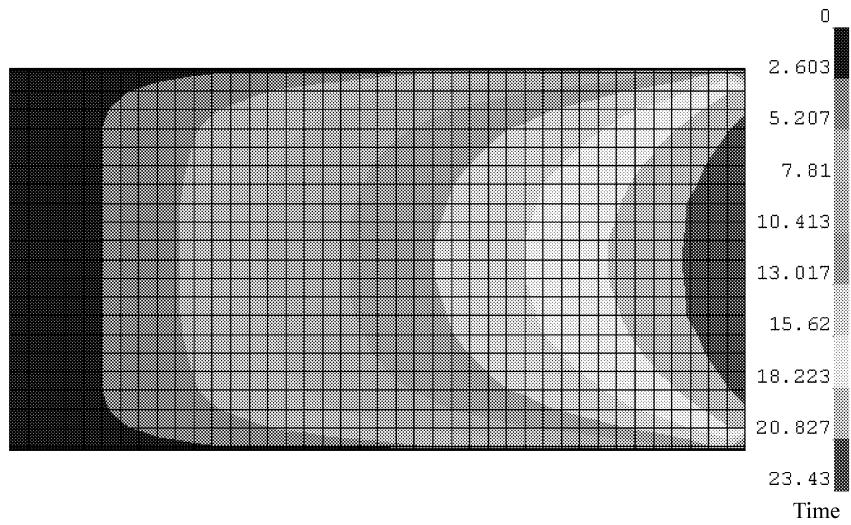


图 6 有边缘效应时不同时刻树脂流动前峰
(不考虑横向流影响常流率线注射)

Fig. 6 Resin flow front with edge effect at different stages
(constant flow rate line injection without transverse flow effect)

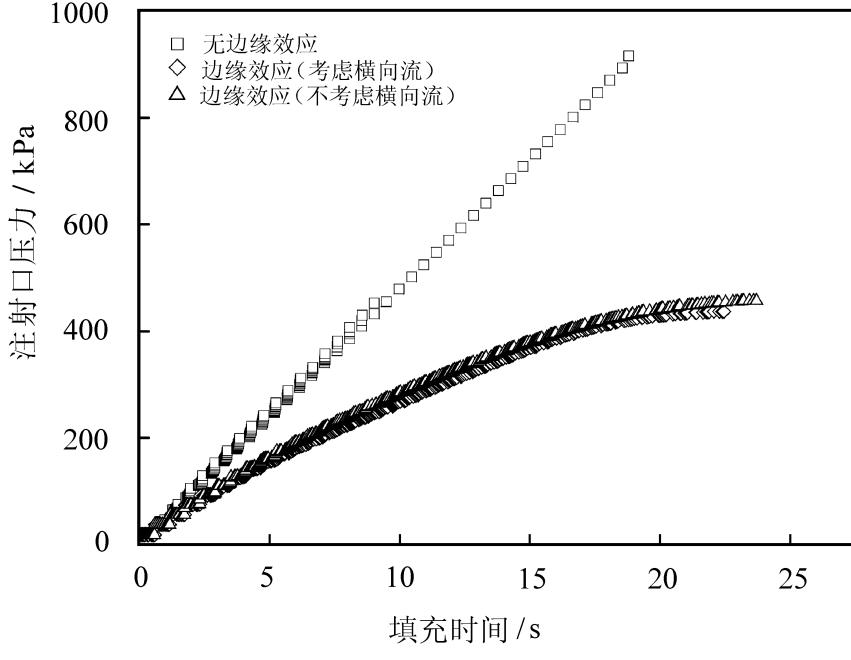


图 7 有无边缘效应时注射口压力历程(常流率线注射)

Fig. 7 Pressures of injection port at different stages
(constant flow rate line injection)

边缘效应的存在导致注射压力显著下降。

(2) 有无横向流的比较: 从图 5 和图 6 可以看到忽略了横向流的影响导致树脂流动前峰与考虑横向流稍有不同。从图 7 可以观察到忽略了横向流的影响情况下比考虑横向流的影响情况下的注射压力稍有增加。

2.1.2 常压力线注射

常压力注射的横向流渗透系数安排同常流率注射的安排。不考虑边缘效应时的树脂流场发展见图 8。考虑横向流影响的树脂流场发展见图 9。忽略横向流影响的树脂流场发展见图 10。不同情况下的注模时间见图 11。

常压力线注射模拟结果分析:

(1) 有无边缘效应的比较: 从图 8 可以看到树脂流动前峰为直线。从图 9 和图 10 可以看到在边缘

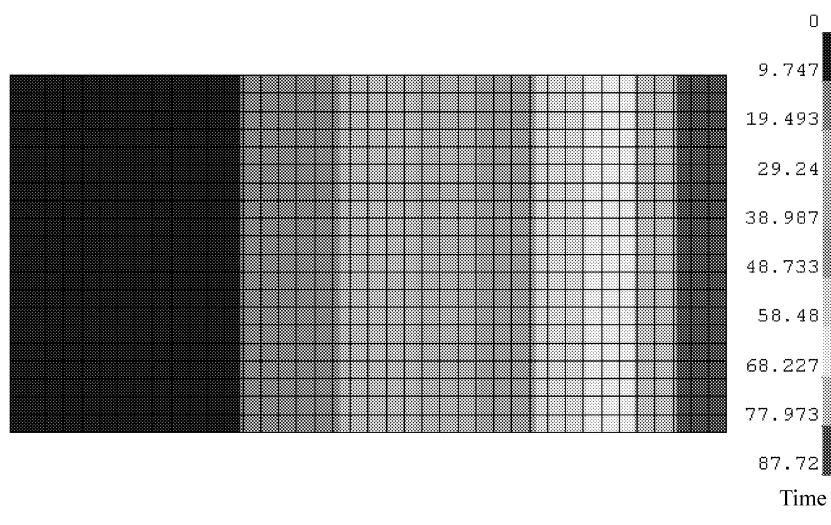


图 8 无边缘效应时不同时刻树脂流动前峰(常压力线注射)

Fig. 8 Resin flow front without edge effect at different stages (constant pressure line injection)

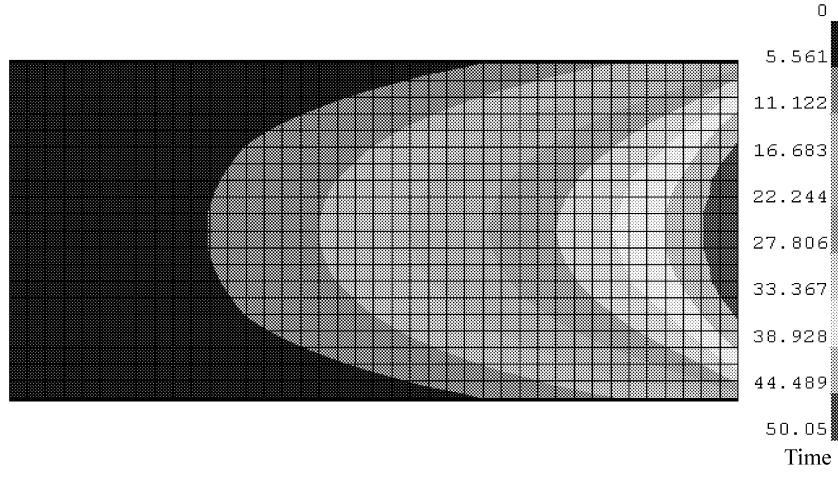


图 9 有边缘效应时不同时刻树脂流动前峰
(考虑横向流影响常压力线注射)

Fig. 9 Resin flow front with edge effect at different stages
(constant pressure line injection with transverse flow effect)

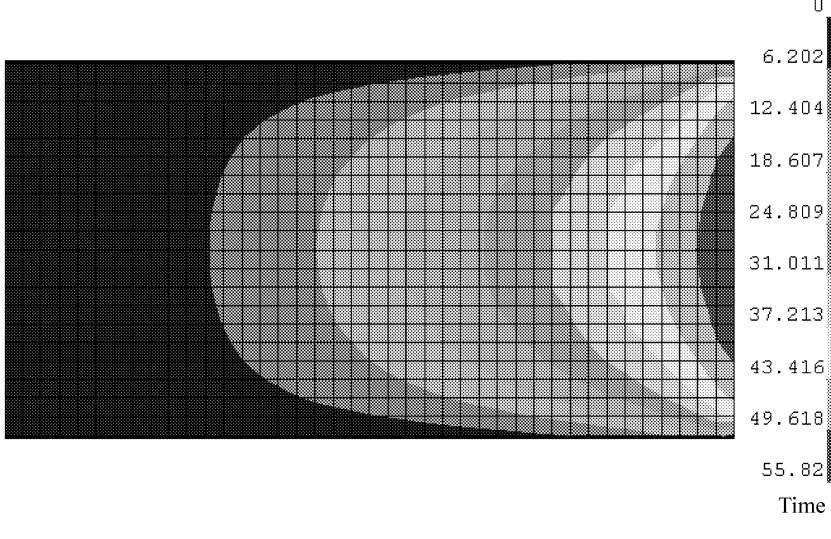


图 10 有边缘效应时不同时刻树脂流动前峰
(不考虑横向流影响常压力线注射)

Fig. 10 Resin flow front with edge effect at different stages
(constant pressure line injection without transverse flow effect)

效应影响下, 树脂流动前峰呈抛物线形状。从图 11 可以观察到边缘效应的存在导致注模时间显著下降。

(2) 有无横向流的比较: 从图 9 和图 10 可以看到忽略了横向流的影响导致树脂流动前峰与考虑横

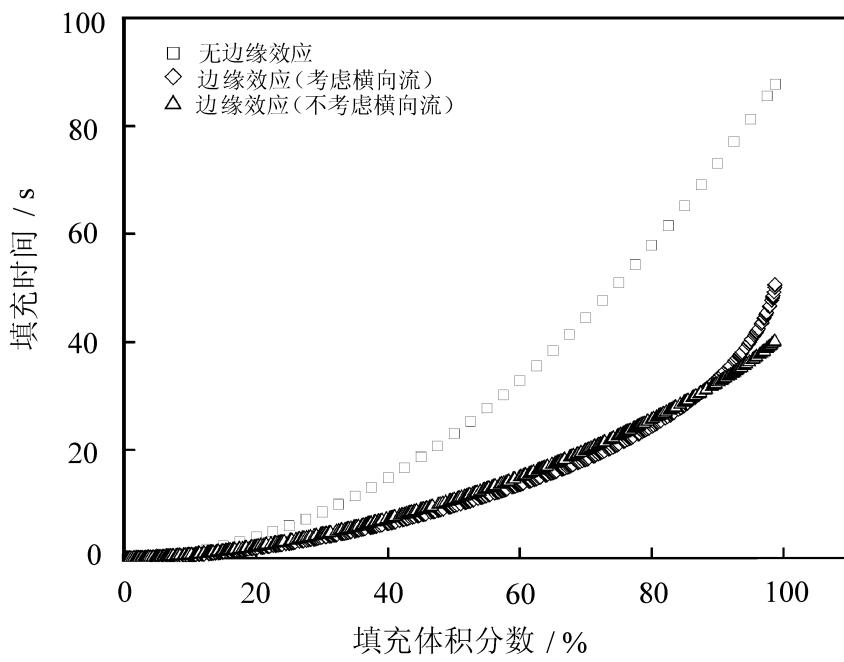


图 11 常压力线注射的填充时间

Fig. 11 Filling times for constant pressure line injection

向流稍有不同。从图 11 可以观察到忽略了横向流的影响情况下比考虑横向流的影响情况下总的注模时间稍有下降。

2.2 点注射

点注射算例研究的主要目的是研究不同流动通道对注模过程的影响, 算例模型做了调整, 流动通道中的渗透系数取为预制体的 100 倍, 并且都考虑了横向流的影响。算例的几何模型为 $0.5 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}$ 的矩形板。孔隙度为 0.5, 树脂粘度为 $0.08 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。纤维预制体的渗透率为各向同性 $K_x = K_y = 3.648 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 。注射条件分别为常流率注射和常压力注射。注射流率 q_0 为 $2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, 注

射压力 P_0 为 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。所有流动通道的宽度均为 5 mm。流动通道安排在不同位置的几种工况见图 12。工况 1 为没有边缘效应的情况, 工况 2 为单侧有流动通道的情况, 工况 3 为中间有流动通道的情况, 工况 4 为双侧有流动通道的情况, 工况 5 为四周有流动通道的情况。

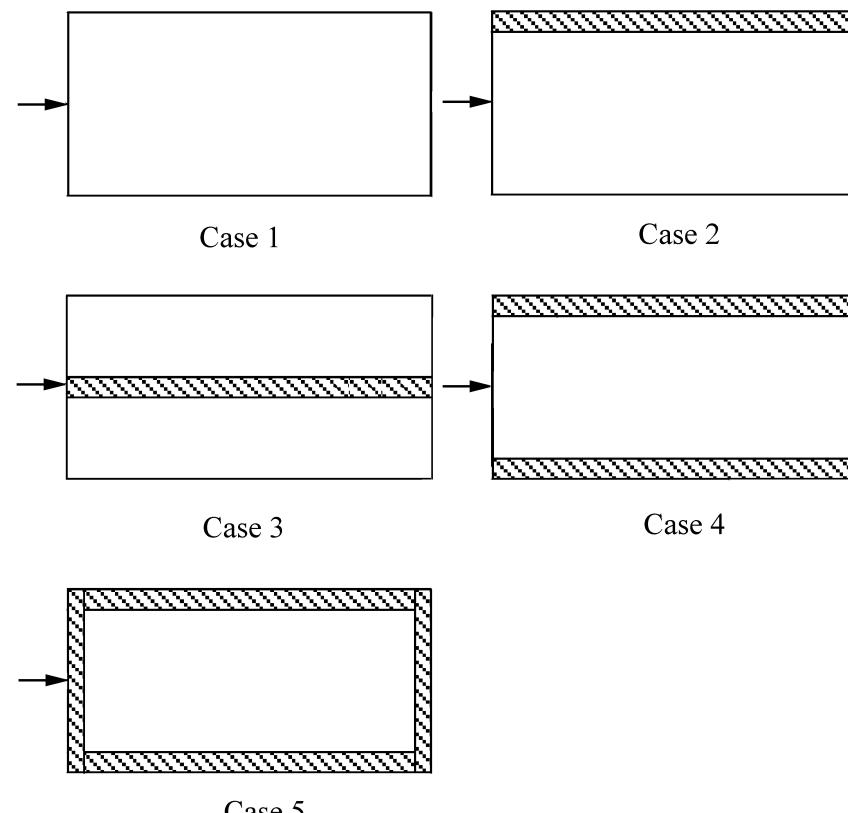


图 12 流动通道安排在不同位置的几种工况

Fig. 12 Different cases for flow channels configuration

2.2.1 常流率点注射

常流率点注射五种工况的树脂流场发展情况见图 13。五种工况的注射口压力历程见图 14。

常流率点注射模拟结果分析:

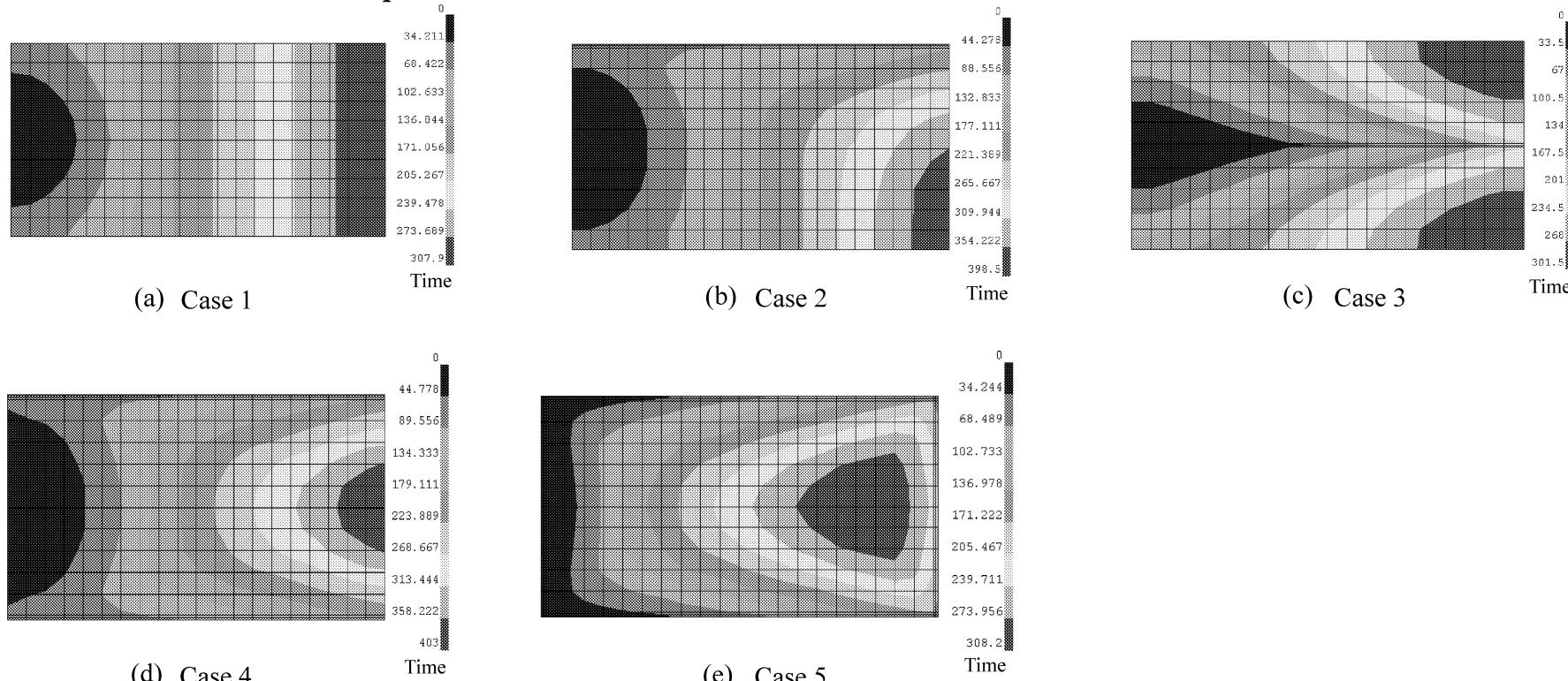


图 13 不同时刻的树脂流动前峰(常流率点注射)

Fig. 13 Resin flow front at different stages

(constant flow rate port injection)

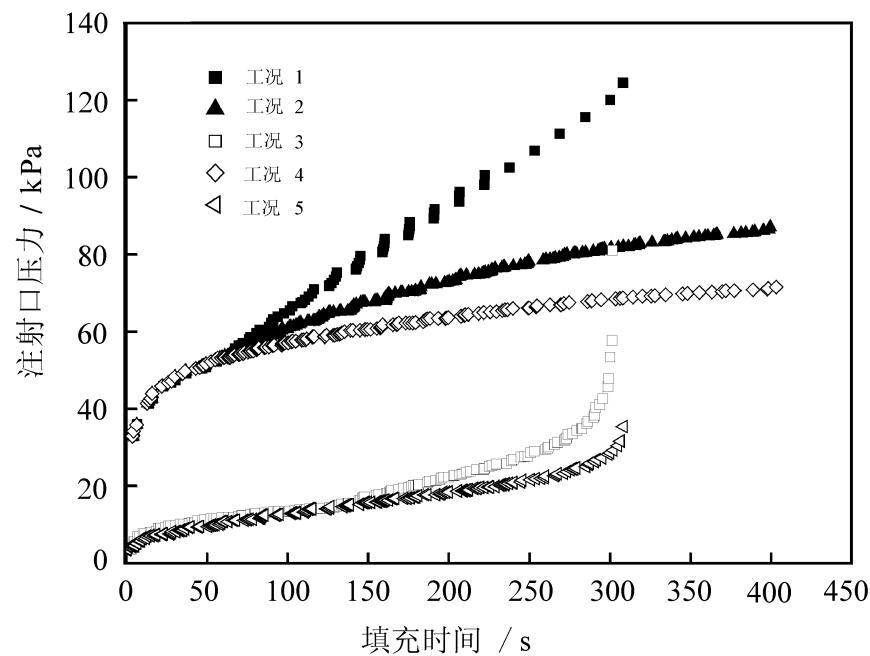
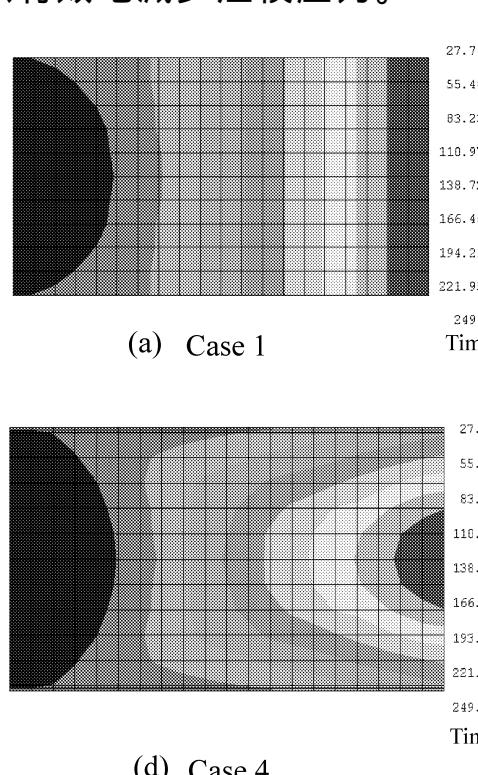


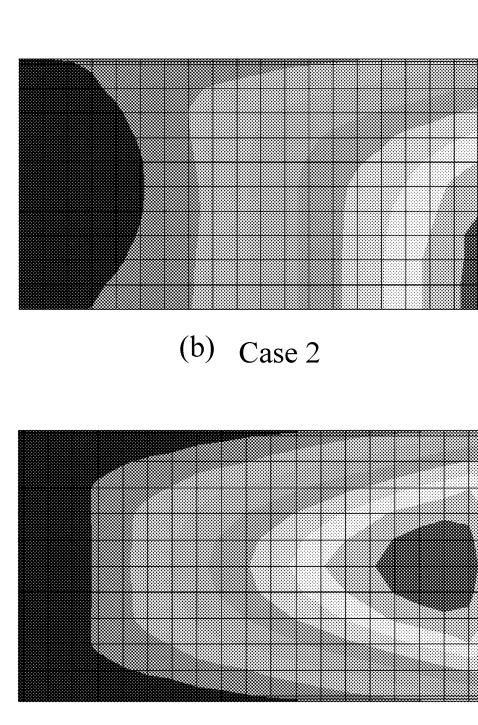
图 14 五种工况的注射口压力历程(常流率点注射)

Fig. 14 Pressure of injection port at different stages
(constant flow rate port injection)

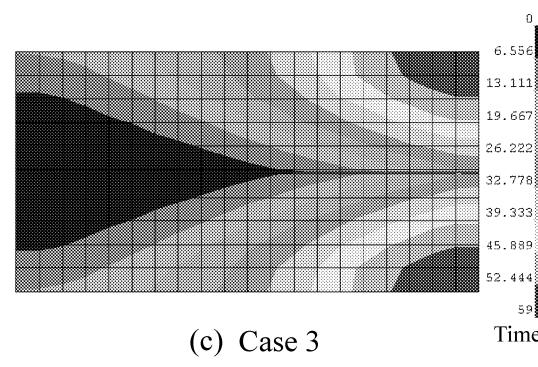
从图 13 可以清楚地观察到不同位置的流动通道怎样影响流动前峰发展的。对于不考虑边缘效应的正常情况下, 本算例的排气口可以设在右边的两个角点处。然而, 由于流动通道的存在导致了流动前峰发生了不期望的变化, 如对于工况 4 和工况 5 仍按照正常情况设置排气口, 则可导致工艺缺陷——干斑的形成。从图 14 可以观察到流动通道的存在导致了注射口压力下降, 注射压力按照从大到小的顺序为: 工况 1, 工况 2, 工况 4, 工况 3, 工况 5。这也从另一方面说明可以利用流动通道允许树脂先填充某些区域, 如果能合理地设计流动通道和排气口, 则可以有效地减少注模压力。



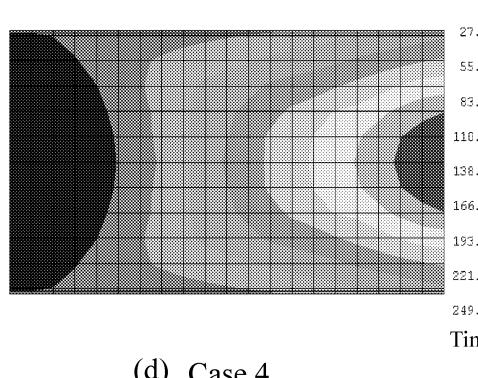
(a) Case 1



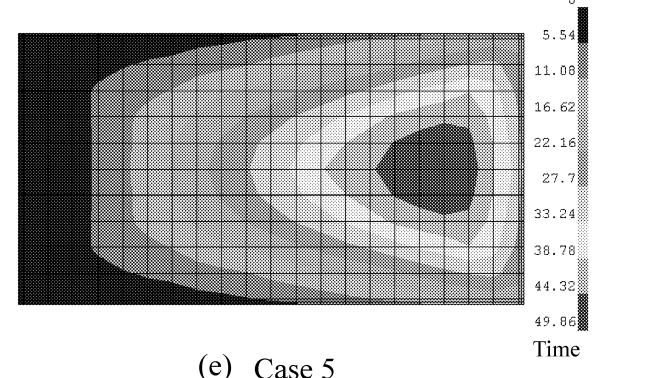
(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4



(e) Case 5

2.2.2 常压力点注射

常压力点注射五种工况的树脂流场发展情况见图 15。五种工况的填充时间见图 16。

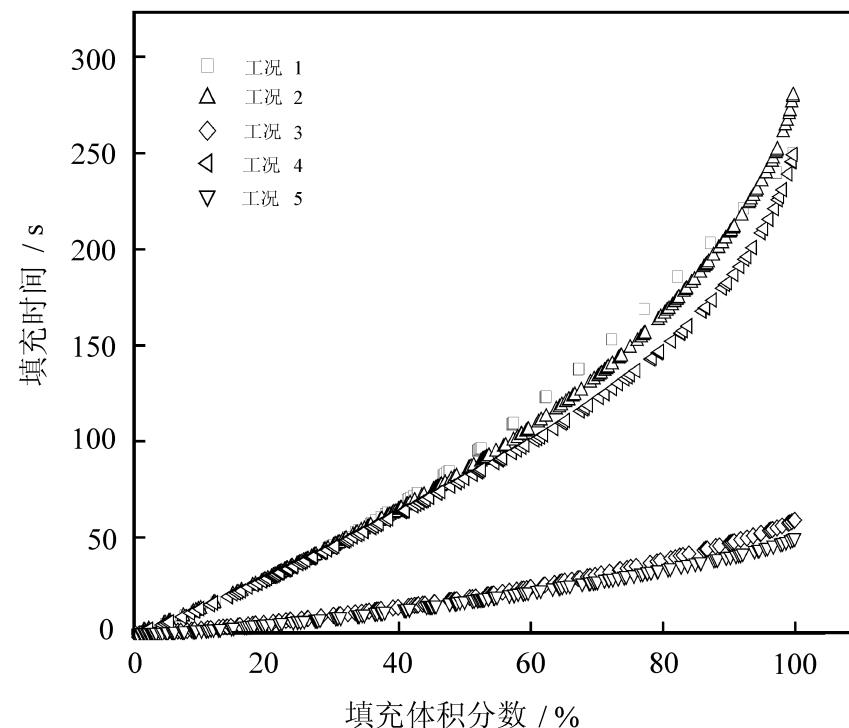


图 16 常压力点注射的填充时间

Fig. 16 Filling times for constant pressure port injection

常压力点注射模拟结果分析:

从图 15 可以清楚地观察到不同位置的流动通道影响流动前峰发展的情况类似于常压力注射的情况。同样的对于工况 4 和工况 5 仍按照正常情况设置排气口, 则可导致工艺缺陷——干斑的形成。从图 16 可以观察到流动通道的存在导致了填充时间的变化, 工况 1 和工况 4 的总的填充时间基本相同为 249 s, 对于工况 2 总的填充时间反而增加为 280 s,

图 15 不同时刻的树脂流动前峰(常压力点注射)

Fig. 15 Resin flow front at different stages (constant pressure port injection)

工况 3 的为 59 s, 工况 5 的为 50 s。工况 3 和工况 5 减少的注模时间相当可观, 这也说明在常压力注射条件下, 如果合理设计流动通道和排气口, 则可以有效地减少注模时间。

3 结语

本文作者采用等效渗透系数方法模拟边缘效应, 得到了其影响下的树脂流动前峰曲线和压力场。研究表明: 一方面边缘效应可能导致不期望的树脂流场发展而形成工艺缺陷——干斑; 另一方面可以利用边缘效应提高工艺效率: 常流率注射时减小合模压力和注射压力, 常压力注射时可以减少注模时间。

参考文献:

- [1] Abraham D, McIlhagger R. Investigations into various methods of liquid injection to achieve mouldings with minimum void contents and full wet out [J]. Composites: Part A, 1998, 29 (5): 533- 539.
- [2] Richardson M O W, Zhang Z Y. Experimental investigation and flow visualization of the resin transfer mould filling process for non-woven hemp reinforced phenolic composites [J]. Composites: Part A, 2000, 31(12): 1303- 1310.
- [3] Hammami A, Gauvin R, Trochu F. Modeling the edge effect in liquid composites molding [J]. Composites: Part A, 1998, 29(5): 603- 609.
- [4] BICKERTON S, ADVANI S G, MOHAN R V, et al. Experimental analysis and numerical modeling of flow channel effects in resin transfer molding [J]. Polymer Composites, 2000, 21(1): 134- 153.
- [5] Bickerton S, Sozer E M, Graham P J, et al. Fabric structure and mold curvature effects on preform permeability and mold filling in the RTM process. Part I: Experiments [J]. Composites: Part A, 2000, 31(5): 423- 438.
- [6] Bickerton S, Sozer E M, Simacek P, et al. Fabric structure and mold curvature effects on preform permeability and mold filling in the RTM process. Part II: Predictions and comparisons with experiments [J]. Composites: Part A, 2000, 31(5): 439- 458.
- [7] Bickerton Simon, Advani Suresh G. Characterization and modeling of race-tracking in liquid composite molding process [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(15): 2215- 2229.
- [8] Daryl R C, Selim Y, Cheng-hsien W, et al. Mold filling analysis in resin transfer molding [J]. Polymer Composites, 1996, 17(2): 251- 264.
- [9] 吕 起, 薛元德. RTM 工艺充模过程数值模拟及实验比较 [J]. 复合材料学报, 1999, 16(1): 131- 136.
- [10] 江顺亮. RTM 加工工艺充模过程的计算机模拟 [J]. 复合材料学报, 2002, 19(2): 13- 17.