

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.06.017

树脂流动前锋流向监测的参数化曲线模型

胡中取¹,王喆²,禹岳¹,姚文胜¹,杨辰龙¹

(1. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室,杭州 310027; 2. 武汉第二船舶设计研究所,武汉 430200)

摘要: 复合材料真空辅助树脂传递成型 (VARTM) 工艺过程的实时监测是复合材料成型的关键技术环节,可以有效避免缺陷提升性能。VARTM 中预成型体有树脂流动前锋的到达、流速、流向等关键参数,针对流向这一参数进行分析,通过超声传感器信号来计算流向,以对液体成型过程的树脂流动进行实时监测。选用方压电晶片主动传感器进行实验,通过传感器的信号建立归一化幅值曲线的梯形参数化模型,对数据进行拟合,计算出流向的理论转角。最后在不同厚度的有机玻璃板上选用不同频率的传感器进行实验,将计算得出的理论转角与实际流向相比较,对计算方法的准确性和有效性进行评估,最终在较薄模具 (10 mm) 中获得了良好的流向计算效果。

关键词: 真空辅助树脂传递成型; 预成型体; 流向监测; 曲线模型

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)06-0095-06

Parameterized Curve Model for Monitoring Flow Direction of Resin Flow Front

Hu Zhongqu¹, Wang Zhe², Yu Yue¹, Yao Wensheng¹, Yang Chenlong¹

(1. State Key Lab of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430200, China)

Abstract : Real-time monitoring of the vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) process of composite is a key technical link of composite molding, which can effectively avoid defects and improve performance. In the liquid molding process, the preform has key parameters such as the arrival, flow rate, and flow direction of the resin flow front. The flow direction was analyzed and the ultrasonic sensor signal was used to calculate the flow direction to monitor the resin flow in the liquid molding process in real-time. A square piezoelectric wafer active sensor was used for experiments, and a trapezoidal parameterized model of the normalized amplitude curve was established through the signal of the sensor, the data was fitted, and the theoretical rotation angle of the flow direction was calculated. The experiment was carried out with sensors of different frequencies on the plexiglass plates of different thicknesses, and the calculated theoretical angle was compared with the actual flow direction, and the accuracy and effectiveness of the calculation method were evaluated, and finally in a thinner mold (10 mm) obtained good flow direction calculation effect.

Keywords : vacuum-assisted resin transfer molding ; preform ; flow direction monitoring ; curve model

复合材料真空辅助树脂传递成型 (VARTM) 工艺就是采用单面模具建立一个闭合系统,利用真空导入技术,将不饱和树脂固化成型,其过程的监测是复合材料成型的关键工艺环节。在复合材料预成型体中,树脂流动前锋的到达、速度、方向等参数十分复杂,而这些参数影响着材料的浇筑品质,若能准确实时地掌握树脂流动前锋的流动参数,可以有效控

制灌注流程,避免干斑、白点等缺陷,对液体成型工艺有着至关重要的作用。

国内外很多学者对 VARTM 预成型体内的树脂流动情况进行了研究。P. Celle 等^[1-2] 基于 Darcy 定理耦合 Stokes 方程的方法对树脂在预成型体内外的单相不饱和流动情况进行分析,不过数值收敛性方面效果并不理想。Y. S. Song 等^[3] 在分析双重

基金项目: 山西省科技重大专项项目 (20201102003)

通信作者: 杨辰龙,博士,副教授,主要研究方向为超声检测及成像

收稿日期: 2021-03-19

引用格式: 胡中取,王喆,禹岳,等. 树脂流动前锋流向监测的参数化曲线模型 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(6) : 95-100.

Hu Zhongqu, Wang Zhe, Yu Yue, et al. Parameterized curve model for monitoring flow direction of resin flow front[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(6) : 95-100.

渗透性多孔介质的三维流动时应用二次衰退模型,以探索 VARTM 工艺的数值模拟和优化设计。B. Yenilmez 等^[4]对 VARTM 的注胶控制过程进行分析建模,探索了该工艺的影响要素和树脂浸润机理,对过程进行仿真。R. Gantois 等^[5-6]在宏观尺度上通过边界元的方法对树脂浸润过程进行模拟和比较,运算速度较快但精度低,并且局限于边界预测。X. Sun 等^[7]建立了液体成型过程的流动模型,认为树脂在导流介质中的运动可以视为平面流动,但是存在垂直渗流。T. G. 古托夫斯基^[8]提出了 Naviers-Stokes 方程应用于解决树脂在预成型体和模腔壁间敞口流道中的流动问题,为 VARTM 的边缘效应做出了理论上的研究。

戴福洪等^[9]同样研究了边缘效应,应用等效渗透系数和控制体积方法来避免干斑工艺缺陷的产生,不过该方法计算精度较差,预报结果并不准确。杨波等^[10-11]在微观和细观层面对树脂流动和缺陷采用有限元方法进行了预测,不过缺乏宏观层面的探讨。杨金水等^[12]对真空注塑过程中树脂的流动模型、机理、数值模拟和流动行为进行了监测和控制,并在此基础上展望了真空注入过程中树脂流动特性的研究前景。王晓霞等^[13-14]研究了液体成型中应力对结构的影响,针对玻璃钢模具 VARTM 过程中的树脂固化过程进行了分析。

笔者将提出基于压电晶片主动传感器的超声

波信号处理模型,主要聚焦于对纤维预成型体中树脂流动前锋到达流向的建模表征研究。

1 流向监测的梯形参数化曲线模型

利用非旋转对称横截面的传感器可获得脉冲回波幅值随时间变化曲线,而这是与树脂流动方向有关的函数。选取如图 1 所示的方形传感器,树脂流动前锋的幅值减小形状取决于树脂流向传感器的瞬时方向,转角 θ 在 $[0, 45]$ 范围内。

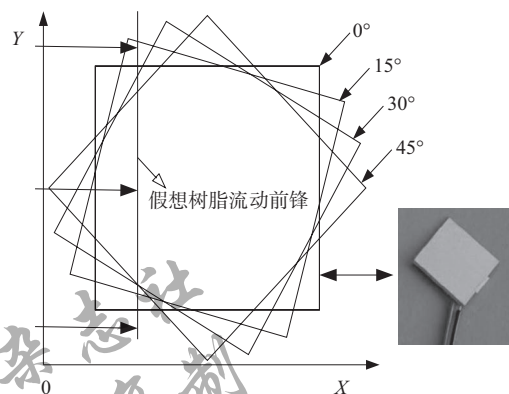


图1 坐标系中不同转角的方形晶片

定义正方形传感器的边长为 l , 已知转角 θ 就能获得树脂浸渍方形晶片感应区域的面积 S_{square} , 将其除以总传感器面积 S 来获得归一化润湿面积。树脂流动前锋取近似直线, 假定压电晶片的声场分布均匀, 其归一化位置定义为 $\bar{x}$ 。故润湿面积计算公式如下:

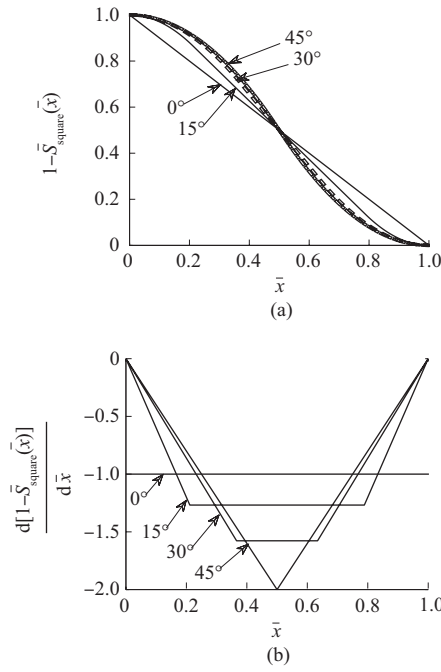
$$S_{\text{square}}(\bar{x}) = \begin{cases} \frac{[\bar{x}l(\sin\theta + \cos\theta)]^2}{\sin 2\theta}, & 0 < \bar{x} \leq \frac{l \sin \theta}{l(\sin \theta + \cos \theta)} \\ \frac{l^2 \tan \theta}{2} + \frac{[\bar{x}l(\sin \theta + \cos \theta) - l \sin \theta]^2}{\cos \theta}, & \frac{l \sin \theta}{l(\sin \theta + \cos \theta)} < \bar{x} \leq \frac{l \cos \theta}{l(\sin \theta + \cos \theta)} \\ l^2 - \frac{[l(\sin \theta + \cos \theta)(1 - \bar{x})]^2}{\sin 2\theta}, & \frac{l \cos \theta}{l(\sin \theta + \cos \theta)} < \bar{x} \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\bar{S}_{\text{square}}(\bar{x}) = S_{\text{square}}(\bar{x})/l^2 \quad (2)$$

在 $\bar{x} = 0$ 时压电晶片范围内的纤维保持干燥, 超声反射能量应该为 1(100%)。随着树脂流动前锋慢慢浸渍纤维预成型体, 超声波反射能量减小, 理想状况下将润湿范围里的超声波反射能量直接视为 0(0%), 故取 $1 - \bar{S}_{\text{square}}(\bar{x})$ 表示实际反射接收到的超声能量值占比或反射率。在图 1 中传感器截面以不同的角度 θ 绘制在坐标系中, 并使用不同线条进行了区分, 该坐标系未归一化。将树脂流动前锋恰好接触方形压电晶片的最左边缘顶点处记为直角坐标

系横坐标的零点或起点, 将最右边缘处顶点记为直角坐标系横坐标的最大值或终点。在图 2a 中绘制了归一化润湿面积同归一化树脂流动前锋位置的相关曲线, 图 2b 则显示了其导数曲线。

根据图 2, 当 $\theta = 0^\circ$ 时直线形状的树脂流动前锋是均匀扫过方形区域, 这就导致了面积线性增加而获得了恒定导数曲线。当 θ 分布在 $(0, 45]$ 范围内, 可知整个曲线被分为三部分, 从导数曲线可以明显看出, 第一部分逐渐提高面积增加速度, 第二部分则



a—归一化润湿面积 - 树脂流动前锋位置曲线; b—导数曲线

图2 不同转角方形晶片的归一化润湿面积 - 树脂流动前锋位置的关系曲线及其导数曲线

是湿润面积以恒定速度增加因而获得了平直线,第三部分类似于第一部分,但越靠后面面积增速越缓和。因此形成了图中的梯形曲线,当 θ 恰好等于 45° 时

$$M_{\text{square}} = \begin{cases} 0, & \text{other} \\ -k_1 x + b_1, & \mu_{\text{square}} - \sigma_1 - \frac{\sigma_2}{2} < x < \mu_{\text{square}} - \frac{\sigma_2}{2} \\ \gamma, & \mu_{\text{square}} - \frac{\sigma_2}{2} \leq x < \mu_{\text{square}} + \frac{\sigma_2}{2} \\ k_1 x + b_2, & \mu_{\text{square}} + \frac{\sigma_2}{2} \leq x \leq \mu_{\text{square}} + \frac{\sigma_2}{2} + \sigma_1 \end{cases}$$

$$k_1 = \frac{\gamma}{\sigma_1}, b_1 = \gamma \left(1 - \frac{2\mu_{\text{square}} - \sigma_2}{2\sigma_1}\right), b_2 = \gamma \left(1 + \frac{2\mu_{\text{square}} + \sigma_2}{2\sigma_1}\right)$$

通过梯形曲线模型 M_{square} 拟合测量数据后,使用参数 σ_1 和 σ_2 的值来计算转角 θ :

$$\tan \theta = \frac{\sigma_1}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (4)$$

将由上述方法计算的转角与实际方形压电晶片工作时树脂流动前锋的流动角进行对比,可以验证该模型的可靠程度。

2 实验验证与分析

选取有机玻璃板作为实验模具,通过在其表面粘贴不同转角的方形传感器来确定幅值曲线变化与流动角的关系。让局部呈直线推进的树脂流动前

中间第二部分特征消失而形成了三角形曲线,相当于极端状态下的梯形。

研究所用的方法是在测量得到的幅值曲线上拟合参数化曲线。理想状态下(声场分布均匀/润湿区域零超声反射率)可以观察到,导数曲线具有较为规则的几何形状,具体表现为等腰梯形。将归一化幅值曲线的梯形导数曲线合理参数化,如图3所示。

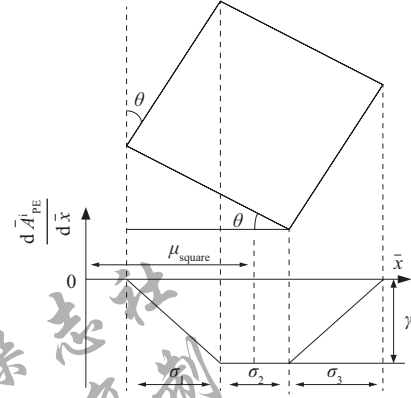


图3 梯形导数曲线的分段参数化示意图

方形压电晶片顺时针旋转 θ 之后获得新的梯形曲线,该曲线可以由参数 $\sigma_1, \sigma_2, \mu_{\text{square}}$ 和 γ 充分描述,其中 σ_1 和 σ_2 大于零。由以上四个参数定义梯形参数化曲线模型 M_{square} 如下:

(3)

锋通过具有固定转角 θ 的正方形压电晶片主动传感器,其结果等效于局部流动角为 θ 的树脂流动前锋通过转角为 0 的正方形晶片。

在实验操作中,由于环境噪声、测量误差和不完善的实验条件会产生其它干扰。尽管压电晶片已经尽量平行于模具界面贴合,但达到理想情况下传感器与模具均匀耦合的条件不太现实。另外,在传感器横截面上无法建立充分均匀的电场密度,至少在晶片边缘处电场线将发生变形而减弱。使用正方形传感器时,四个顶点的角度变化剧烈,可以预期在边缘直角区域中电场畸变现象会加强,从而导致树

脂流动前锋幅值归一化曲线与流动方向角之间的内在关系进一步削弱。

实验中采用厚度为 10 mm 和 20 mm 两种规格的有机玻璃模具来验证算法,每个方形压电晶片主动传感器均被旋转了某一特定转角 θ ,通过环氧树脂基导电银胶粘贴在模具表面,如图 4 所示,压电晶片传感器的具体各项配置参数见表 1。



图 4 部分实验方形压电晶片布置图 (模具厚度 10 mm)

表 1 实验选择的方形压电晶片参数

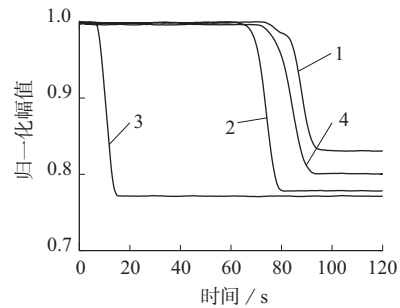
模具厚度 / mm	压电晶片主频 / MHz	压电晶片尺寸 / mm
10	2.5	10×10, 15×15
20	2.5	10×10, 15×15

实验过程类似于圆盘形压电晶片,采集每个传感器归一化脉冲幅值变化曲线,根据视频图像信息得到归一化脉冲幅值距离导数曲线。图 5 展示了厚度 20 mm 有机玻璃上硅油流动前锋逐渐通过传感器上方感应区域的过程,尽量保持流动前锋成一条直线。

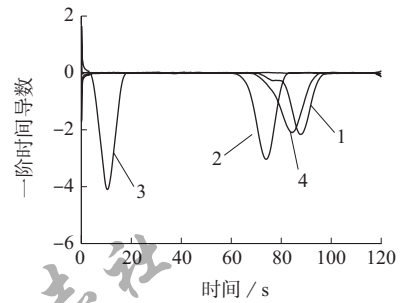


图 5 不同转角方形压电晶片实时流量前锋流向监测

经过多组实验,采集了两种厚度模具下若干不同转角的归一化幅值曲线,图 6 为模具厚度 10 mm 时部分压电晶片的归一化幅值曲线及其一阶时间导数曲线,其中压电晶片中心频率为 5 MHz。从图中可以看出,传感器外形尺寸的小幅变化并不太影响实际归一化幅值曲线演变规律,原因归结为大直径



(a)



(b)

晶片转角,边长:1—14.5°,15 mm;2—6.4°,15 mm;

3—31.2°,15 mm;4—3.1°,10 mm

a—归一化幅值;b—一阶时间导数

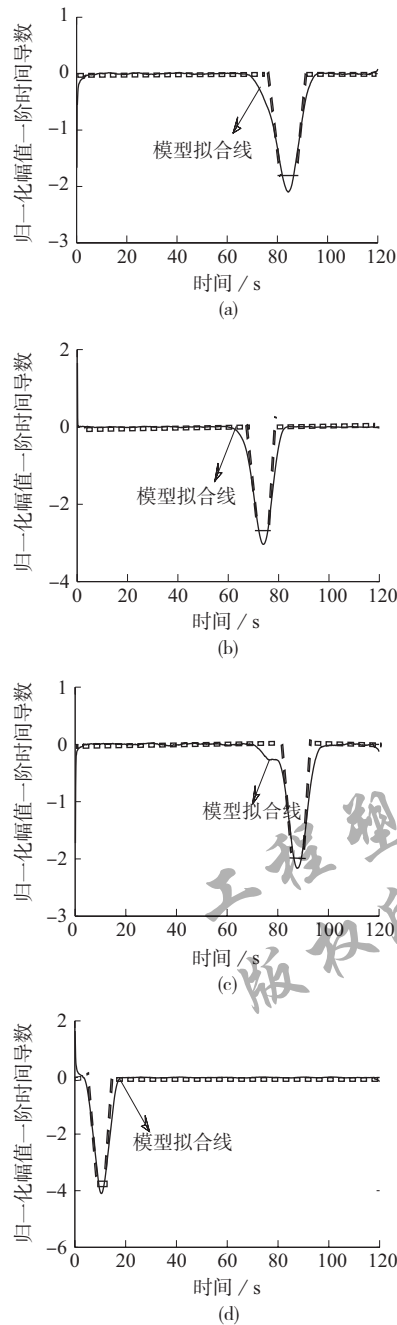
图 6 方形压电晶片实时流量前锋流向监测曲线

传感器的边缘声场保持了较弱的状态。

与此同时,压电晶片转角愈小,其归一化幅值一阶导数曲线的横向跨度愈大,这点与建立的特点相吻合。此外,由于模具厚度的存在及超声波声场的特点使得方形压电晶片的归一化幅值一阶导数曲线并不像理想模型那样棱角分明,这就需要进行拟合处理。

以上四个样本为例,通过模型拟合得到归一化幅值一阶时间导数曲线的理论结果,如图 7 所示。拟合过程以遵循较小的均方差为主,虚线代表拟合得到的模型曲线。最终所关注的参数为 σ_1 和 σ_2 ,其大小用采样点数衡量,计算出对应的转角 θ ,具体数值见表 2。

从上述 10 mm 模具上部分传感器的实验结果来看,对于小角度的转角来说,实验获得的结果不太理想,其偏差超过了 50% 左右。而大角度转角的实验结果较为理想,偏差低于 15%,能够较好地符合实际流动前锋流向的偏转角度。由于实验中受到玻璃纤维局部渗透率的差异化影响而无法绝对保持硅油流动前锋水平推进,小角度压电晶片造成的偏差将会大规模放大。



晶片转角,边长:a—3.1°,10 mm;b—6.4°,15 mm;
c—14.5°,15 mm;d—31.2°,15 mm

图7 方形压电晶片实时流量前锋流向监测模型拟合曲线

表2 部分压电晶片实验结果

参数	晶片转角,边长			
	14.5°,15 mm	6.4°,15 mm	31.2°,15 mm	3.1°,15 mm
σ_1	22	20	46	10
σ_2	53	99	35	95
$\theta/(^\circ)$	16.34	9.54	29.59	5.44

表3是所有参与实验的压电晶片最终计算得到的理论转角。从表3可以分析得到,20 mm大厚度模具中理论转角和实际转角差距很大,并且计算得

到的理论转角均集中在 $20^\circ \sim 30^\circ$,可见方形压电晶片的理论方形声场在厚截面模具中已经基本转变成具有旋转对称性的形状,失去了对流动前锋流向的显著区分能力。

表3 所有压电晶片的实验结果

压电晶片参数 (设计转角,边长,频率)	模具厚度/mm	实验计算 转角 $\theta/(^\circ)$
14.5°,15 mm,5 MHz	10	16.34
6.4°,15 mm,5 MHz	10	9.54
31.2°,15 mm,5 MHz	10	29.59
3.1°,10 mm,5 MHz	10	5.44
30.4°,10 mm,5 MHz	20	21.87
28.2°,10 mm,2 MHz	20	30.72
21.6°,10 mm,2 MHz	20	29.15
15.8°,10 mm,2 MHz	20	24.43

图8为实际转角和计算转角的对比分析。尽管厚度20 mm模具获得的效果较差,但在较薄的10 mm模具中获得了相对较好的结果,这使得总体结果依然趋近于 45° 直线。该组数据的相关系数为0.8682,实际转角和实验计算转角之间的标准差为 5.5° ,最大偏差接近 75% ,最小偏差为 5.2% 。若假设相关结果符合正态分布,则该转角以68%的概率将误差锁定在 $\pm 5.5^\circ$ 以内,以95%的概率将误差锁定在 $\pm 11.0^\circ$ 之内。

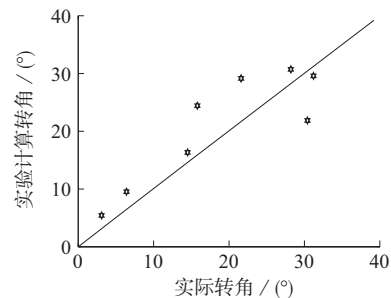


图8 实际转角和实验计算转角的比较

该监测流向方法可用于树脂浸渍过程中,通过调整过程参数来改善后续浸渍效果,并在必要时进行校正。但是,将评估方法限制为较小的模具厚度会降低其技术可用性。

3 结论

针对方形横截面的压电晶片,对其转角的计算进行了模型研究和实验研究。树脂流动前锋的流向受模具厚度的变化影响较大,因为随着模具厚度的增加,声场逐渐削减为旋转对称的分布方式,造成幅值曲线变化对传感器转角的敏感性降低。与此同时,通过实验并利用梯形参数化曲线模型拟合实验数据计算理论转角,最终在较薄模具(厚度10 mm)中获得了良好的流向计算效果。特定模型的表征和特

定材料的校准对流动前锋的流速和流向监控具有较强的适应性。

参考文献

- [1] Celle P, Drapier S, Bergheau J M. Numerical modelling of liquid infusion into fibrous media undergoing compaction[J]. European Journal of Mechanics-A / Solids, 2008, 27(4):647-661.
- [2] Blais M, Moulin N, Liotier P J, et al. Resin infusion-based processes simulation: Coupled Stokes-Darcy flows in orthotropic preforms undergoing finite strain[J]. International Journal of Material Forming, 2017, 10(1):43-54.
- [3] Song Y S, Jeong T T. Computational analysis and simulation of vacuum infusion molding process[C]. Computational Science-iccs, International Conference, Reading, 2006.
- [4] Yenilmez B, Senan M, Sozer E M. Variation of part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process[J]. Composites Science and Technology, 2009. doi:10.1016/j.compscitech.2008.05.009.
- [5] Gantois R, Cantarel A, Dusserre G, et al. Mold filling simulation of resin transfer molding combining BEM and level set method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 62:57-65.
- [6] Gantois R, Cantarel A, Cosson B, et al. BEM-based models to simulate the resin flow at macroscale and microscale in LCM processes[J]. Polymer Composites, 2013, 34(8):1235-1244.
- [7] Sun X, Li S, Lee L J. Mold filling analysis in vacuum-assisted resin transfer molding. part I: SCRIMP based on a high-permeable medium[J]. Polymer Composites, 1998, 19(6):807-817.
- [8] 古托夫斯基 T G. 先进复合材料制造技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- Gutowski T G. Advanced composite material manufacturing technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [9] 戴福洪, 张博明, 杜善义. RTM 工艺注模过程边缘效应模拟分析[J]. 复合材料学报, 2004, 21(2):161-167.
- Dai Fuhong, Zhang Boming, Du Shanyi. Simulation analysis of edge effects during mould filling in RTM process[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2004, 21(2):161-167.
- [10] 杨波. 复合材料 RTM 工艺充模过程数值仿真与缺陷预测研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- Yang Bo. Research on numerical simulation and defect prediction for the filling process of resin transfer molding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [11] Li C, Cantarel A, Gong X. Influence of structural parameters at microscale on the fiber reinforcement[J]. Journal of Composite Materials, 2019, 53(7):863-872.
- [12] 杨金水, 肖加余, 曾竟成, 等. 真空导入模塑工艺树脂流动行为研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 2010, 40(1):5-8.
- Yang Jinshui, Xiao Jiayu, Zeng Jingcheng, et al. Research progress of resin flow behavior in vacuum injection molding process[J]. Aerospace Materials Technology, 2010, 40(1):5-8.
- [13] 王晓霞, 王成国, 贾玉玺, 等. 热固性树脂固化动力学模型简化的新方法 [J]. 材料工程, 2012(6):67-70.
- Wang Xiaoxia, Wang Chengguo, Jia Yuxi, et al. A new method for simplification of thermosetting resin curing kinetic model[J]. Materials Engineering, 2012(6):67-70.
- [14] 王晓霞, 贾玉玺, 程程, 等. 树脂传递模塑工艺的模内固化及复合材料脱模变形 [J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(9):151-154.
- Wang Xiaoxia, Jia Yuxi, Cheng Cheng, et al. In-mold curing and demolding deformation of composite materials in resin transfer molding process[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2010, 26(9):151-154.

优惠销售中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国合成树脂供销协会加工与应用分会为了配合 2000~2019 年先后召开的中国工程塑料复合材料技术研讨会, 共编辑、出版了 20 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术, 以及文献综述、评论等, 突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析。现尚有部分《论文集》, 以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘, 现以优惠价格 (含邮费) 销售, 欢迎订阅。

1. 2004~2019 年中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》, 优惠价 400 元/套。

2. 2000~2019 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集光盘, 优惠价 300 元/盘。本光盘除收录 2000~2019 年 20 本《论文集》的全部内容外, 还包括历次会议的代表通讯录。

邮局汇款

收款地址: 山东济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位: 《工程塑料应用》杂志社

邮编: 250031

电话: (0531)85878223 85878057 85878278

传真: (0531)85947355

银行汇款

户名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

帐号: 1602001229014425546

网上订购: <http://www.epa1973.com>