

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.03.003

短玻纤增强工程塑料纤维取向张量影响因素研究

黄达勇^{1,2}, 丁智平¹, 荣继刚², 黄友剑², 曾家兴¹

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要: 基于Taguchi 试验设计方法, 采用 $L_{25}(5^6)$ 正交矩阵进行试验设计, 并利用Moldflow 对短玻纤增强PA66 复合材料的注塑成型过程进行了3D 数值模拟, 研究注塑成型不同工艺参数和玻纤相互作用系数对注塑件纤维取向张量的影响。结果表明: 对于短玻纤增强PA66 复合材料, 纤维相互作用系数对注塑件纤维取向影响最显著, 其贡献率达99.999 994 57%; 在实验参数范围内, 随着纤维相互作用系数的提高, 注塑件的纤维取向张量单调下降; 模具温度、熔体温度、注塑时间、保压压力及保压时间5 个注塑工艺参数对纤维取向张量影响甚微。同时, 以纤维相互作用系数作为独立设计变量, 利用Newton 线性差值, 建立了注塑件纤维取向张量的4 阶回归方程, 该方程可用于预测注塑件主应力方向的纤维取向, 定性评估其强度增强效果。

关键词: 短玻纤; 纤维取向张量; 注塑成型; Taguchi DOE; 数值模拟; 回归方程

中图分类号: TB334

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)03-0012-07

Research on Influential Factors of Fiber Orientation Tensor of Short-Glass Fiber Reinforced Engineering Plastics

HUANG Dayong^{1,2}, DING Zhiping¹, RONG Jigang², HUANG Youjian², ZENG Jiaying¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Zhuzhou Time New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract : Based on Taguchi experimental design method, the $L_{25}(5^6)$ orthogonal matrix has been adopted for an experimental design, a 3-D numerical simulation of the injection molding process of short-glass fiber reinforced PA66 composites has been carried out, and a research on the influence of different process parameters of the injection molding and interaction coefficients of glass fiber on the orientation tensor of injection molded fibers has been conducted by making use of Moldflow software. The experimental result shows that the fiber interaction coefficient (C_f) has a significant effect on fiber orientation, with a contribution rate as high as 99.999 994 57%. Within the range of experimental parameters, the average fiber orientation tensor decreases monotonically as the fiber interaction coefficient (C_f) increases; while the fiber orientation tensor is under little influence of five injection molding processing parameters, namely, the mold temperature, the melt temperature, the injection time, the packing pressure and packing pressure time. Meanwhile, with fiber interaction coefficients the independent design variables, and by making use of Newton linear difference, a 4 order regression equation of the fiber orientation tensor of injection molded parts has thus been established. This equation can provide references for the prediction of the fiber orientation at the principal stress direction of injection-molded parts and the determination and evaluation of the nature of the intensity enhancement effect.

Keywords : short-glass fiber; fiber orientation tensor; injection molding; Taguchi DOE; numerical simulation; regression equation

收稿日期: 2016-03-29

作者简介: 黄达勇 (1992-), 男, 湖南邵东人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为现代机械强度理论及应用,

E-mail: hdy85116@126.com

通信作者: 丁智平 (1956-), 男, 湖南桃江人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事机械强度方向的教学与研究,

E-mail: dzp0733@sohu.com

0 引言

随着生态环境的日益恶化,为能实现节能减排、低碳环保,各国都提出了一些相应的解决措施,其中的轻量化技术被公认为是目前行之有效的一种方法和手段^[1]。

纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer,或 fiber reinforced plastic, FRP)是一类由增强纤维材料,如玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等,与基体材料经过缠绕、模压或拉挤等成型工艺而形成的高分子复合材料^[2]。

复合材料中的纤维含量、纤维相互作用系数、纤维的长径比以及其注塑工艺参数等,均会对制备的纤维增强复合材料注塑结构件的纤维取向分布产生影响,使得注塑制品呈现出较强的各向异性,进而影响制品的力学性能和使用性能^[3-5]。大量科研工作者在这一领域进行了研究。已有相关研究中,有些研究者考虑了纤维间的相互作用,而有些研究者忽略了纤维间的相互作用。如 F. P. Bretherton^[6]、R. C. Givler 等^[7]在不考虑纤维间的相互作用下,分别研究了复合材料中纤维的运动和取向分布;而 S. M. Dinh^[8]、F. Folgar^[9]等在建立纤维增强聚合物纤维取向的计算公式时,考虑了纤维间的相互作用。研究者们通过实验和数据模拟研究,得到了各种结论和实验模型。如 M. Vincent 等^[10]通过实验和数值模拟,研究了塑料制品中纤维含量、厚度以及浇口形状等对注塑制品纤维取向的影响;J. M. PARK 等^[11]采用耦合算法,并且结合动力学理论与 Folgar-Tucker 模型,修正了原有短纤维取向模型。已有研究中,关于复合材料中纤维取向和材料性能方面的研究较多。如钟明强等^[12]用取向函数和平均取向角来表征复合材料中纤维取向程度;张红平等^[13]研究了纤维取向与流场应力分布的相关性;熊爱华等^[2,14-17]对各类纤维增强复合材料的注塑成型和纤维取向进行了深入研究;何芳芳等^[5]重点研究了在阿基米德螺旋线模具中,当在塑料中加入纤维后,纤维取向结构与工艺参数对纤维取向分布的影响;曾广胜领导的科研小组对纤维增强复合材料的性能进行了较为深入的研究^[18-21]。

通过注塑结构件纤维取向的数值模拟,预测注塑成型过程中纤维的取向分布,对准确预测塑件机械性能以及纤维增强复合材料的实际应用均具有十分重要的作用^[5]。目前,对于注塑结构件,大多采用了简化处理的薄壁理论模型,其虽能获得较理想的结果,但因忽略了厚度效应,导致该模型不能

真实地反映实际情况;随着塑件结构的日益复杂和多样化,全3D模拟已经成为数值模拟发展的必然趋势^[22-23]。近年来,研究者们通过实验和数值模拟对影响纤维增强复合材料注塑制品纤维取向的因素进行了大量研究,但鲜有考虑纤维相互作用系数和不同工艺参数对注塑件纤维取向张量的影响规律方面的研究。因此,作者拟以某型风电联轴器连杆为例,结合 CAE 技术,基于 Taugchi DOE 试验方法^[24-25],利用 Moldflow 软件对注塑件纤维取向进行 3D 数值模拟,研究纤维相互作用系数和不同工艺参数对短玻纤增强 PA66 复合材料注塑制品纤维取向张量的影响规律,旨在优化影响纤维取向张量的参数,使得工程塑件的纤维取向趋近于最大主应力方向,从而提高注塑件的强度和刚度,为轻量化技术的工程化应用提供一定的理论指导依据。

1 纤维取向理论基础

秦计生等^[26]和赵建等^[27]的相关研究中,都对 R. S. Bay 和 C. L. Tuck 给出的纤维取向理论模型^[28]进行了阐述。

在短玻纤增强 PA66 复合材料中,纤维一般被假设为不可弯曲的棒状体,因而可用单位矢量 \boldsymbol{p} 来描述单根纤维的取向,如图 1 所示。

$$\boldsymbol{p} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: \boldsymbol{p} 为纤维的方向;

θ 为 \boldsymbol{p} 与坐标轴 x_3 的夹角;

ϕ 为 \boldsymbol{p} 与坐标轴 x_1 的夹角。

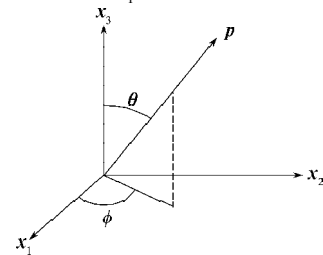


图1 纤维取向矢量

Fig.1 Fiber orientation vector

对于短玻纤增强 PA66 复合材料,可以用纤维取向张量描述纤维取向的状态。定义单位矢量 \boldsymbol{p} 的张量积为在所有方向上的积分并点乘纤维分布函数 $\psi(\boldsymbol{p})$, 即有

$$\boldsymbol{a}_{ijk\dots l} = \int_{\boldsymbol{p}} \boldsymbol{p}_i \boldsymbol{p}_j \boldsymbol{p}_k \dots \boldsymbol{p}_l \psi(\boldsymbol{p}) d\boldsymbol{p} \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{a}_{ijk\dots l}$ 为纤维的取向张量;

p_i, p_j, p_k, p_l 分别为第 i, j, k, l 根纤维的方向;
 $\Psi(P)$ 为分布函数, 表示纤维出现在 θ_1 与 $\theta_1+d\theta, \phi_1$ 与 $\phi_1+d\phi$ 之间的概率。

经过对角化处理后的二阶取向张量状态描述如图 2 所示^[9, 26-27]。图 2 中的 a 图代表平面单轴取向, 即纤维沿单一方向排列; b 图代表双轴取向, 即纤维平均分布在 2 个主轴方向, 同时代表平面中的随机取向状态; c 图代表纤维在 3 个方向轴取向或是空间中的随机取向。

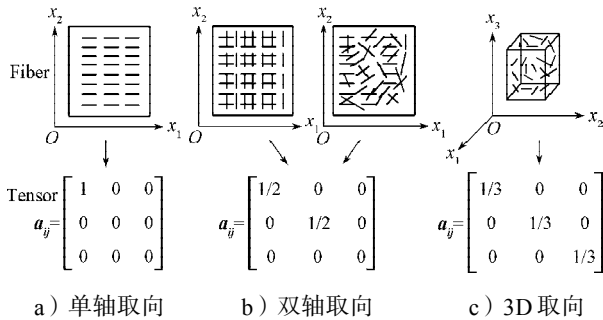


图 2 纤维取向张量

Fig. 2 Fiber orientation tensor

2 注塑成型数值模拟试验

2.1 塑件材料

本数值模拟试验选用巴斯夫股份公司 (Badische Anilin-und-Soda-Fabrik, BASF) 生产的纤维质量分数为 50%, 短玻纤聚酰胺 66 (polyamide 66, PA66), 牌号为 Ultramid A3EG10 的复合材料。

2.2 模型建立及试验设计

本研究利用 Pro/E 建立风电联轴器连杆塑件的三维实体模型, 并且将其导入 Moldflow 软件平台, 建立高质量的三维实体网格模型; 然后设置浇口位置和 2 个冷却水道。所建立的三维实体网格模型如图 3 所示。

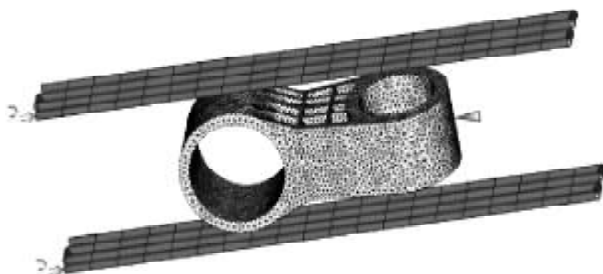


图 3 连杆注塑模型

Fig. 3 A model of injection-molded link

由于纤维相互作用系数^[8]是表征因纤维之间的相互作用而产生的随机取向效应系数。因此, 本文采用 Taguchi 试验设计方法, 重点研究纤维相互作用

系数及主要工艺参数对成型过程中纤维取向张量的影响, 基于正交试验表, 对注塑成型过程中纤维取向张量情况进行数值模拟。数值模拟采用 Cool+Fill+Pack+Warp 注塑成型工艺分析顺序, 选用 $L_{25}(5^6)$ 正交矩阵对纤维相互作用系数 (因素 A)、模具温度 (因素 B)、熔体温度 (因素 C)、注塑时间 (因素 D)、保压压力 (因素 E)、保压时间 (因素 F) 共 6 个影响因素, 对纤维取向张量的影响规律进行分析。试验因素和水平设计见表 1。

表 1 试验因素与水平设计

Table 1 Experimental factors and horizontal designs

水 平	因 素					
	纤维 相互作用 系数 A	模具 温度 B/°C	熔体 温度 C/°C	注塑 时间 D/s	保压 压力 E/%	保压 时间 F/s
1	0.000 1	75	290	2.25	60	5
2	0.001 0	80	295	2.35	70	7
3	0.010 0	85	300	2.45	80	9
4	0.050 0	90	305	2.55	90	11
5	0.100 0	95	310	2.65	100	13

本文采用如下二阶张量描述纤维取向状态:

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中^[9] $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ 。

已有研究表明, 纤维增强复合材料在纤维方向上的抗拉强度最好。本文研究的风电联轴器连杆在工作时, 连杆两端承受拉伸载荷, 类似于单轴拉伸, 因此, 当 $\lambda_1 = 1$ 时, 纤维的增强效果最好。在注塑成型时, 不能保证纤维的取向完全一致, 以使 $\lambda_1 = 1$ 。在 Moldflow 软件中进行数值模拟, 当纤维取向张量数值为 1 时, 纤维取向效果最佳; 且纤维取向张量越接近 1, 纤维取向效果越好, 连杆两端所能承受的拉伸载荷越大。

3 试验结果与分析

3.1 信噪比分析

有学者用式 (4) 所示望小值^[15, 29]研究了注塑件的翘曲变形和体积收缩率等; 而本文的纤维取向张量为望大值^[30]问题, 因而为了使目标值最大, 应用式 (5) 计算纤维取向张量的信噪比 S/N。

$$\eta = -10 \lg \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]; \quad (4)$$

$$\eta = -10 \lg \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]. \quad (5)$$

以信噪比 S/N 对注塑成型过程进行分析^[15], 所得的影响结果如图 4 所示。正交试验结果见表 2, 选取的各因素对纤维取向张量

表 2 L₂₅(5⁶)正交试验结果分析
Table 2 Result analysis of the L₂₅(5⁶) orthogonal test

实验号	列号						评价指标 纤维取向张量
	1(A)	2(B)	3(C)	4(D)	5(E)	6(F)	
1	1	1	1	1	1	1	0.994 4
2	1	2	2	2	2	2	0.994 0
3	1	3	3	3	3	3	0.994 1
4	1	4	4	4	4	4	0.993 9
5	1	5	5	5	5	5	0.993 8
6	2	1	2	3	4	5	0.981 1
7	2	2	3	4	5	1	0.981 0
8	2	3	4	5	1	2	0.980 9
9	2	4	5	1	2	3	0.980 6
10	2	5	1	2	3	4	0.981 4
11	3	1	3	5	2	4	0.935 6
12	3	2	4	1	3	5	0.935 5
13	3	3	5	2	4	1	0.935 9
14	3	4	1	3	5	2	0.935 3
15	3	5	2	4	1	3	0.935 4
16	4	1	4	2	5	3	0.801 6
17	4	2	5	3	1	4	0.801 5
18	4	3	1	4	2	5	0.796 8
19	4	4	2	5	3	1	0.798 1
20	4	5	3	1	4	2	0.798 5
21	5	1	5	4	3	2	0.673 9
22	5	2	1	5	4	3	0.664 5
23	5	3	2	1	5	4	0.672 3
24	5	4	3	2	1	5	0.674 4
25	5	5	4	3	2	1	0.668 2
<i>K</i> ₁	0.994 04	0.877 32	0.874 48	0.876 26	0.877 32	0.875 52	
<i>K</i> ₂	0.981 00	0.875 30	0.876 18	0.877 46	0.875 04	0.876 52	
<i>K</i> ₃	0.935 54	0.876 00	0.875 96	0.876 04	0.876 60	0.875 24	
<i>K</i> ₄	0.799 30	0.876 46	0.876 02	0.876 20	0.874 78	0.876 94	
<i>K</i> ₅	0.670 66	0.875 46	0.877 14	0.874 58	0.876 80	0.876 32	
<i>R</i>	0.323 38	0.002 02	0.002 66	0.002 88	0.002 54	0.001 70	
<i>M</i> ₁	-0.051 92	-1.053 03	-1.075 48	-1.062 21	-1.053 31	-1.067 31	
<i>M</i> ₂	-0.166 62	-1.068 47	-1.062 92	-1.051 89	-1.072 00	-1.060 46	
<i>M</i> ₃	-0.578 75	-1.064 40	-1.064 80	-1.062 97	-1.059 45	-1.069 15	
<i>M</i> ₄	-1.945 78	-1.061 30	-1.063 25	-1.063 27	-1.072 97	-1.056 04	
<i>M</i> ₅	-3.469 81	-1.068 10	-1.054 99	-1.074 96	-1.057 58	-1.062 31	
<i>T</i>	3.417 89	0.015 44	0.020 48	0.023 07	0.019 66	0.013 10	

注: *K_i* 和 *M_i* 分别表示某个因素在第 *i* 个水平下的纤维取向张量质量指标的平均值和信噪比 S/N; *R* 和 *T* 分别表示在某个因素影响下质量指标的极差; *i*=1,2,3,4,5 代表 5 个水平。

由表 2 所示的正交试验结果分析数据可发现, 因素 A 即纤维的相互作用系数对应的纤维取向张量质量指标平均值和信噪比的极差均最大, 分别为 0.323 38 和 3.417 89。由图 4 可知, 基于信噪比分析, 对于短玻纤增强 PA66 复合材料, 因素 A 即纤维的相互作用

系数对注塑件纤维取向张量的影响最大, 且在实验参数范围内, 随着纤维相互作用系数的提高, 注塑件的纤维取向张量单调下降; 而因素 B (模具温度)、因素 C (熔体温度)、因素 D (注塑时间)、因素 E (保压压力) 以及因素 F (保压时间) 5 个因素, 基本没

有引起纤维取向张量产生明显的变化。

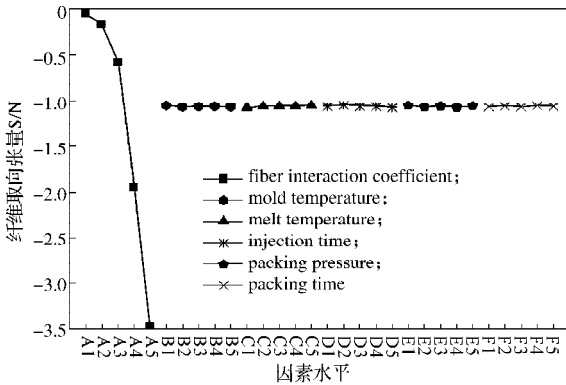


图4 各因素对纤维取向张量S/N的影响
Fig. 4 Influence of various factors on fiber orientation tensor of S/N

3.2 影响因素的显著度分析

为了定量分析纤维相互作用系数和各个主要工艺参数对纤维取向张量的影响，确定各因素对纤维取向张量影响的贡献率，对试验结果进行方差分析 (analysis of variance, ANOVA) [15]。所得纤维相互作用系数和工艺参数对塑件纤维取向张量影响的方差分析结果见表3。

表3 各影响因素对纤维取向张量的方差分析结果

Table 3 Variance analysis of the influence of various factors on the fiber orientation tensor

因素	纤维取向张量		
	自由度	F 值	贡献率/%
A	4	21 170.959 02	99.999 994 57
B	4	0.000 17	8.3×10^{-7}
C	4	0.000 24	11.2×10^{-7}
D	4	0.000 27	12.9×10^{-7}
E	4	0.000 33	15.7×10^{-7}
F	4	0.000 13	6.2×10^{-7}

分析表3中的数据可知：因素A即纤维相互作用系数对制品纤维取向张量的影响最大，其贡献率达99.999 994 57%，而因素B（模具温度）、因素C（熔体温度）、因素D（注塑时间）、因素E（保压压力）以及因素F（保压时间）5个因素对纤维取向张量的影响较小，可忽略不计。

3.3 回归分析

根据表2中的试验结果数据，提取纤维相互作用系数5个水平下的平均纤维取向张量，并通过这5组样本数，由Newton差值法得到其差商表，具体如表4所示。

以纤维取向张量影响高度显著的纤维相互作用系数参数 x_i 作为独立变量，利用Newton差值进行线性回归分析，可得出如下注塑件纤维取向张量的回归方程 $f(x_i)$ ：

$$f(x_i) = 0.995 61 - 15.843 3x + 1 260.956x^2 - 29 554.37x^3 + 182 042x^4 \quad (6)$$

表4 纤维相互作用系数5个水平下纤维取向张量差商表
Table 4 A lozenge diagram of the fiber orientation tensor under 5 levels of fiber interaction coefficients

x_i	$f(x_i)$	一阶差商	二阶差商	三阶差商	四阶差商
0.000 1	0.994				
0.001 0	0.981	-14.489			
0.010 0	0.935	-5.052	953.310		
0.050 0	0.799	-3.406	33.574	-18 431.600	
0.100 0	0.671	-2.573	9.258	-245.615	182 042

参考文献[24]中计算纤维之间的相互作用系数经验公式，可得

$$C_i = 0.018 4 \exp\left(-0.714 8V_f \frac{L}{D}\right) \quad (7)$$

式中： C_i 为纤维相互作用系数；

V_f 为纤维体积分数；

L/D 为纤维长径比。

$f(x_i)$ 可用于定量预测注塑件的纤维取向，结合式(7)，可确定短玻纤增强PA66的纤维长径比；反之，也可以通过材料的纤维长径比反向求出短玻纤增强PA66的纤维间相互作用系数，准确预测注塑件主应力方向的纤维取向张量，进而定性评估其强度增强效果，为轻量化技术工程应用提供了指导依据。

4 结论

采用Taguchi正交试验方法，结合CAE技术，对短玻纤增强PA66复合材料的注塑成型过程进行了3D数值模拟，研究了注塑成型纤维相互作用系数和工艺参数对注塑件纤维取向张量的影响，可得到如下结论。

1) 信噪比正交试验结果表明，纤维的相互作用系数对注塑件纤维取向张量影响最大，且在试验参数范围内，随着纤维相互作用系数的提高，注塑件的纤维取向张量单调下降。

2) 影响因素的显著度分析结果表明，对于短玻纤增强PA66复合材料，因素A即纤维相互作用系数对注塑件纤维取向张量的影响最为显著，其贡献率达99.999 994 57%。

3) 模具温度、熔体温度、注塑时间、保压压力以及保压时间5个注塑工艺参数对纤维取向张量影响甚微。

4) 以对纤维取向张量影响高度显著的纤维相互作用系数作为独立设计变量，利用Newton差值进行线性回归分析，得出了注塑件纤维取向张量的4阶回

归方程,该方程可用于定量预测注塑件的纤维取向,定性评估其强度增强效果,因而为轻量化技术的工程应用提供了指导依据。

参考文献:

- [1] 马鸣图,易红亮,路洪洲,等.论汽车轻量化[J].中国工程科学,2009,11(9):20-27.
MA Mingtu, YI Hongliang, LU Hongzhou, et al. On the Light-Weighting of Automobile[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(9): 20-27.
- [2] 熊爱华,柳和生,黄益宾,等.长玻纤增强聚合物注塑充填行为和纤维取向模拟[J].高分子材料科学与工程,2015,31(10):110-114.
XIONG Aihua, LIU Hesheng, HUANG Yibin, et al. 3D Simulation of Filling Behavior and Fiber Orientation for Long Glass Fiber Reinforced Polymer Composites During Injection Molding Process[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2015, 31(10): 110-114
- [3] POCHIRAJU K, VOJIN J. Modeling Material Property Heterogeneity in Fiber-Reinforced Injection Molded Plastic Parts[J]. Polymer Composites, 2005, 26(1): 98-113.
- [4] 刘保臣,申长雨,刘春太,等.注射成型短玻纤增强PP微观结构及力学性能研究[J].工程塑料应用,2009,37(6):52-55.
LIU Baocheng, SHEN Changyu, LIU Chuntai, et al. Micro Structure and Mechanical Properties of Injection-Molded Short-Fiber-Reinforced Polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(6): 52-55.
- [5] 何芳芳,周洲,蒋炳炎.纤维增强塑料注射成型熔体流动性及纤维取向预测[J].复合材料学报,2013,30(增刊1):128-133.
HE Fangfang, ZHOU Zhou, JIANG Bingyan. Prediction of Melt Flowability and Fiber Orientation for Fiber Reinforced Polymer Injection Molding[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(S1): 128-133.
- [6] BRETHERTON F P. The Motion of Rigid Particles in a Shear Flow at Low Reynolds Number[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1962, 14(2): 284-304.
- [7] GIVLER R C, CROCHET M J, PIPES R B. Numerical Prediction of Fiber Orientation in Dilute Suspensions[J]. Journal of Composite Materials, 1983, 17(17): 330-343.
- [8] DINH S M, ARMSTRONG R C. A Rheological Equation of State for Semi-Concentrated Fiber Suspensions[J]. Journal of Rheology, 1984, 28(3): 207-227.
- [9] FOLGAR F, TUCKER C L. Orientation Behaviors of Fibers in Concentrated Suspensions[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 1984, 3(2): 98-119.
- [10] VINCENT M, GIROUD T, CLARKE A, et al. Description and Modeling of Fiber Orientation in Injection Molding of Fiber Reinforced Thermoplastics[J]. Polymer, 2005, 46(17): 6719-6725.
- [11] PARK J M, JEONG S J, PARK S J. Flake Orientation in Injection Molding of Pigmented Thermoplastics[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2012, 134(1): 141-153.
- [12] 钟明强,濮阳楠,益小苏,等.短玻纤增强聚丙烯注射压力对微观结构和力学性能影响[J].复合材料学报,2000,17(4):6-10.
ZHONG Mingqiang, PU Yangnan, YI Xiaosu, et al. Effects of Injection Pressure on the Microstructures and Mechanical Properties of Short Glass Fiber Injection-Moulded Reinforced Polypropylene[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(4): 6-10.
- [13] 张红平,欧阳洁.纤维增强聚合物熔体的纤维取向和流场应力分析[J].复合材料学报,2007,24(6):153-159.
ZHANG Hongping, OUYANG Jie. Fiber Orientation and Stress Analysis for Fiber Reinforced Polymeric Melt[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(6): 153-159.
- [14] 熊爱华,柳和生,黄兴元,等.短玻纤增强聚合物注塑充填过程及纤维取向数值模拟[J].高分子材料科学与工程,2012,28(3):161-164.
XIONG Aihua, LIU Hesheng, HUANG Xingyuan, et al. Numerical Simulation on the Filling Process and Fiber Orientation of Short Fiber Reinforced Polymer[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2012, 28(3): 161-164.
- [15] 熊爱华,柳和生,黄兴元,等.工艺参数对短玻纤纤维增强PP复合材料注射压力和翘曲变形的影响[J].高分子材料科学与工程,2012,28(6):163-168.
XIONG Aihua, LIU Hesheng, HUANG Xingyuan, et al. Influence of Processing Parameters on Injection Pressure and Warpage of Short-Glass Fiber Reinforced PP Injection-Molded Part[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2012, 28(6): 163-168.
- [16] 熊爱华,柳和生,黄兴元,等.短玻纤增强聚丙烯复合材料气体辅助注塑成型真三维模拟[J].高分子材料科学与工程,2012,28(9):182-186.
XIONG Aihua, LIU Hesheng, HUANG Xingyuan, et al. True 3D Numerical Simulation of Gas-Assisted Injection of Short Fiber-Reinforced PP[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2012, 28(9): 182-186.
- [17] 江青松,柳和生,熊爱华,等.长纤维增强聚合物注塑流动纤维取向分布数值模拟[J].高分子材料科学与工程,2015,31(3):123-127.
JIANG Qingsong, LIU Hesheng, XIONG Aihua, et al. Numerical Simulation on the Fiber Orientation Distribution During Flow in Injection Molding of Long Fiber Reinforced Polymer[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2015, 31(3): 123-127.
- [18] 曾广胜,徐成,谢桂容,等.植物纤维增强PS木塑复合材料的性能研究[J].包装学报,2011,3(2):20-24.

- ZENG Guangsheng, XU Cheng, XIE Guirong, et al. Study on Mechanical Properties of Fiber Reinforced PS Composites [J]. Packaging Journal, 2011, 3(2): 20-24.
- [19] 陈 华, 赖沛铭, 江太君, 等. 竹纤维增强聚氯乙烯发泡复合材料的制备与性能[J]. 包装学报, 2014, 6(3): 14-19.
- CHEN Hua, LAI Peiming, JIANG Taijun, et al. Preparation and Properties of Bamboo Fiber Reinforced PVC Composites[J]. Packaging Journal, 2014, 6(3): 14-19.
- [20] 张 礼, 曾广胜, 孙 刚, 等. 基于BP神经网络的淀粉/EVA复合发泡材料流变性能预测模型及应用[J]. 包装学报, 2015, 7(3): 14-19.
- ZHANG Li, ZENG Guangsheng, SUN Gang, et al. Prediction Model and Application of Starch/EVA Composite Foaming Material Rheological Property Based on BP Neural Network[J]. Packaging Journal, 2015, 7(3): 14-19.
- [21] 张 礼, 曾广胜. 淀粉/PVA挤出发泡复合材料的流变行为及泡孔形态[J]. 包装学报, 2016, 8(1): 25-29.
- ZHANG Li, ZENG Guangsheng. Rheological Behavior and Cell Morphology of Extruding Foaming Starch/PVA Composites[J]. Packaging Journal, 2016, 8(1): 25-29.
- [22] LI Y C, ZHANG Y S, LI D Q. Shrinkage Analysis of Injection-Compression Molding for Transparent Plastic Panel by 3D Simulation[J]. Applied Mechanics & Materials, 2010(44/45/46/47): 1029-1033.
- [23] CARDOZO D. Three Models of the 3D Filling Simulation for Injection Molding: A Brief Review[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2008, 27(18): 1963-1974.
- [24] 王利霞, 杨 杨, 王 蓓, 等. 注塑成型工艺参数对制品收缩率变化的影响及工艺参数优化[J]. 高分子材料科学与工程, 2004, 20(2): 173-176.
- WANG Lixia, YANG Yang, WANG Bei, et al. Investigation of the Influence of Processing Parameter on Volumetric Shrinkage Variation of Plastic Injection Molded Parts and Process Optimization[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2004, 20(2): 173-176.
- [25] 王利霞, 李 燕, 庄卫国. 注塑工艺和玻纤含量对玻纤增强PP注塑制品收缩的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2009, 25(9): 135-137, 141.
- WANG Lixia, LI Yan, ZHUANG Weiguo. Influence of Processing Parameters and Fiber Content on Shrinkage of Fiber-Reinforced PP Injection-Molded Part[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2009, 25(9): 135-137, 141.
- [26] 秦计生, 彭雄奇, 申 杰, 等. 考虑纤维方向分布的玻纤增强PP复合材料拉伸性能[J]. 复合材料学报, 2013, 30(4): 53-58.
- QIN Jisheng, PENG Xiongqi, SHEN Jie, et al. Tensile Properties of Glass Fiber Reinforced PP Composite Considering Fiber Orientations[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(4): 53-58.
- [27] 赵 建, 曲敏杰, 夏 英, 等. 纤维含量对注塑制品残余应力影响的数值模拟[J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(4): 127-131, 138.
- ZHAO Jian, QU Minjie, XIA Ying, et al. Numerical Simulation of the Effect of Fiber Content on Residual Stresses in Fiber Reinforced Injection Molding[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2014, 30(4): 127-131, 138.
- [28] BAY R S, LII C L T. Stereological Measurement and Error Estimates for Three-Dimensional Fiber Orientation[J]. Polymer Engineering & Science, 1992, 32(4): 240-253.
- [29] SHEN Changyu, WANG Lixia, CAO Wei, et al. Investigation of the Effect of Molding Variables on Sink Marks of Plastic Injection Molded Parts Using Taguchi DOE Technique[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2007, 46(3): 219-225.
- [30] 王更新, 韩之俊. 望大特性与望小特性的质量损失与信噪比的关系[J]. 机械科学与技术, 2000, 19(2): 236-238.
- WANG Gengxin, HAN Zhijun. Relationship Between SN Ratio and Quality Loss of Product in Case of LTB and STB [J]. Mechanical Science And Technology, 2000, 19(2): 236-238.

(责任编辑: 廖友媛)

