

文章编号: 1004-924X(2016)03-0566-08

微注塑散热器流动诱导热导率变化的多尺度数值预测

杨 灿, 曹泽卫, 尹晓红, 阚君武*, 程光明, 李熹平
(浙江师范大学 精密机械研究所, 浙江 金华, 321004)

摘要: 为进一步提高聚合物复合材料热导率, 采用多尺度数值预测法研究了微注塑聚酰胺/碳纤维 (PA66/CFs) 散热器内部CF的流动诱导取向及其对制品热导率的影响规律。首先, 利用Moldflow获取CF取向张量, 并以Comsol Multiphysics构建与之对应的复合材料微元胞。利用正交实验法研究熔体温度、模具温度、最大注射压力及注射流率对微散热器热导率的影响。然后, 对预测数据进行分析获得最优注塑参数组合。最后, 对优化结果进行模拟实验, 验证了多尺度数值预测法的有效性。结果显示: 上述各参数重要程度由大到小依次排列为熔体温度、注射流率、最大注射压力和模具温度; 最佳组合为熔体温度360 °C、模具温度70 °C、最大注射压力220 MPa及注射流率 3×10^{-4} cm³/s。另外, 流动诱导热导率变化最大值达0.36 W/(m·K), 为基体热导率的1.5倍。得到的研究结果为从工艺调控的新角度来改善聚合物复合材料的导热性能提供了理论依据与数据支撑。

关键词: 聚合物复合材料; 微散热器; 注塑成形; 热导率; 多尺度数值预测

中图分类号: TH145.4; TQ320.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162403.0566

Multi-scale numerical prediction of flow-induced thermal conductivity variation in micro-injection molded heat sink

YANG Can, CAO Ze-wei, YIN Xiao-hong, KAN Jun-wu*, CHENG Guang-ming, LI Xi-ping

(Institute of precision machinery, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

* Corresponding Author, E-mail: jupkjw@yahoo.com.cn

Abstract: To further increase the thermal conductivity of polymer composites, a multi-scale numerical prediction method was applied to investigation of the CF flow induced orientation in micro-injection molded polyamide/carbon fibers (PA66/CFs) micro heat sink as well as its influence on the thermal conductivity of composites. Firstly, the Moldflow was used to determine the orientation tensor of the CF, the Comsol Multiphysics was used to develop the corresponding micro cell of the composite, and an orthogonal experiment method was utilized to study the effects of processing parameters including melt temperature, mold temperature, maximal injection pressure and injection flow rate, on the thermal conductivity. Then, on the basis of prediction data analysis, the optimal combination of the injection molding processing parameters was obtained. Finally, the optimal combination results were confirmed using simulated experiment, which verified the feasibility of the proposed multi-scale numerical prediction method. The results show that the influential parameters in descending order of importance are melt temperature, injection flow rate, maximal injection pressure, and mold temperature. Moreover, the obtained optimal combination of the investigated factors is identified as the melt temperature of 360 °C, mold temperature of 70 °C, maximal injection pressure of 220 MPa and the injection flow rate of 3×10^{-4} cm³/s. In

收稿日期: 2015-07-20; 修订日期: 2015-08-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(No. 51405451, 51305406); 浙江省自然科学基金青年基金项目(No. LQ13E050008); 浙江省“钱江人才计划”资助项目(No. QJD1202005); 浙江省大学生“新苗人才计划”项目(No. 2015R4404034)

addition, the maximal variation of the flow-induced thermal conductivity is determined as $0.36 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, which is 1.5 times that of polymer matrix. The findings in the present work provide theoretical basis and data supports for further increasing the thermal conductivity of polymer composites from a new viewpoint of processing control.

Key words: polymer composite; micro heat sink; injection molding; thermal conductivity; multi-scale numerical prediction

1 引言

随着产品微型化趋势的日益增强,近年来微机电系统(MEMS)得到了迅猛发展,微型化、智能化、高精度、低功耗和低成本使MEMS领域成为热点^[1]。调查显示, MEMS市值将从2011年的102亿美元以13%的年均增长率提升至2017年的210亿美元^[2]。随着MEMS中电子元器件数量大幅增加,工作时产生的热量急剧增加,而电子元器件温度每升高 2°C ,其可靠度会下降10%,失效问题中55%是由散热不良所致^[3],故散热问题已成为MEMS领域的技术瓶颈。因此,亟需一种低成本、易于批量化生产高导热微散热器的新原理、方法及工艺。就材料而言,用于成形微散热器的包括金属(如铝、铝铜复合材料等)和非金属(如聚合物)两大类,其中聚合物材料因其成本低、易成形加工及绝缘性良好等优点在微散热器加工中具有广阔的应用前景^[4]。

然而,聚合物本身为热的不良导体,通常其热导率仅为 $0.2\sim 0.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,因此需要向聚合物中添加导热填料形成聚合物复合材料以提高其导热性能^[5-8]。就制造方法而言,微注塑成形是聚合物微构件成形的重要方法,且与目前MEMS领域中广泛应用的硅基材料成形工艺相比具有制造成本低、生产周期短、工艺简单、成形质量高及便于实现批量化和自动化生产等优点^[9]。更重要的是,该成形方法所涉及流道尺寸极小,从而具有极大的熔体形变速率(剪切/拉伸速率)及制品冷却速率,为形成微聚合物产品内部规整晶体结构与高度分子取向,进而最大限度发挥聚合物本征导热效应提供了先决条件^[10]。

目前关于聚合物导热材料的研究主要集中于二元复合材料中填料含量/种类/尺寸/形状对复合材料导热性能的影响^[11,12]及三元复合材料中多种填料的协同作用机理^[13],而关于注塑成形过程中流场参数对复合材料导热性能影响方面的研究报道较少。因注塑过程中熔体流动的复杂性,用实验方法直接研究流场对复合材料形态演变(尤其是流动过程中填料长度的变化)及其对导热性能的影响难度很

大。近年来计算机数值模拟技术的快速发展为研究聚合物流动相关问题提供了极大的便利。本文采用多尺度数值预测方法(即先采用Moldflow获取复合材料中填料的宏观分布状态,再用Comsol Multiphysics建立复合材料的微元胞),对碳纤维填充聚酰胺(PA66/CFs)复合材料微散热器的流动诱导热导率变化进行研究。结合MEMS领域中对径向散热条件的要求,选用齿轮形微散热器为研究对象,以热导率变化为目标,针对其注塑工艺进行多尺度数值预测,旨在为低成本生产高导热聚合物复合材料微散热器提供理论支撑。

2 宏观数值预测模型与方法

2.1 数值预测模型

根据目前公认的微尺度范围($10\sim 1000 \mu\text{m}$),齿轮形微散热器取如下特征参数:分度圆直径 $d=0.55 \text{ mm}$ 、齿数 $z=11$ 、模数 $m=0.05$ 、压力角 $\alpha=20^\circ$ 、宽度 $b=0.25 \text{ mm}$ 。微散热器的三维模型如图1所示。

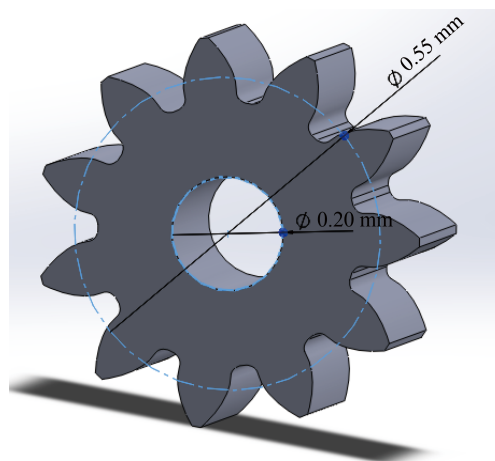


图1 齿轮形微散热器的三维模型

Fig. 1 3D model of gear-shaped micro heat sink

2.2 数值预测方法

假设聚合物熔体为不可压缩流体,不考虑重力与惯性力的影响,且熔体在模壁处不发生滑移现

象, Moldflow仿真主要求解连续性、动量和能量方程:

$$\nabla \cdot \underline{v} = 0, \quad (1)$$

$$\eta \nabla^2 \underline{v} - \nabla p = 0, \quad (2)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \underline{v} \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + \underline{\tau} : \underline{D}, \quad (3)$$

式中: \underline{v} , η , p , ρ , C_p , T , k , $\underline{\tau}$, \underline{D} 分别表示熔体的速度矢量、黏度、压力、密度、比热、温度、热导率、剪切应力张量和变形率张量。求解上述方程需要指定如下边界条件: ①流动前沿熔体压力为零 ($p=0$); ②流动前沿熔体流量等于入口流量 ($Q=Q_{in}$); ③壁面处熔体速度矢量为零, 且温度等于模壁温度 ($\underline{v}=0$; $T=T_{md}$)。

关于填料取向, 目前Folgar-Tucker模型被广泛用于预测纤维(即大长径比填料)的取向状态, 其数学表达式为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_{ij}}{\partial t} + v_k \frac{\partial a_{ij}}{\partial x_k} = & -\frac{1}{2} (\omega_{ik} a_{kj} - a_{ik} \omega_{kj}) + \\ & \frac{1}{2} \lambda (\dot{\gamma}_{ik} a_{kj} + a_{ik} \dot{\gamma}_{kj} - 2 \dot{\gamma}_{kl} a_{ijkl}) + \\ & 2C_I \dot{\gamma} (\delta_{ij} - \alpha a_{ij}), \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $a_{ij}(i, j=1, 2, 3)$ 为纤维取向张量; α 为取向维度; v_k 为速度分量; ω_{ij} 和 $\dot{\gamma}_{ij}$ 分别为涡度和变形速率张量; λ 为与填料形状相关的常数; δ_{ij} 为单位张量; C_I 为相互作用系数。Moldflow中, 将式(4)等号右边最后一项中的 α 变成 $(2+D_z)$, 其中 D_z 为相互作用系数在厚度方向的分量。其中流动方向上的取向张量分量包含了纤维取向最重要的定量信息, 且对流动、工艺及材料参数最为敏感, 且考虑到模型的平面对称性, 主要讨论微齿轮形散热器内部的 a_{11} 变化情况及其对制品热导率的影响规律。

将上述三维CAD模型导入聚合物注塑成形专用数值模拟软件Moldflow中, 并选择实体(3D)网格类型进行网格划分。由于微散热器尺寸较小, 需选择足够小的网格边长以顺利划分网格; 同时为平衡因网格太密而造成的计算时间剧增问题, 经反复测试后采用如下网格划分策略: 网格边长从轮齿处的0.01 mm逐渐增大到中心部位的0.03 mm。最终的3D网格模型如图2所示, 共包含15 105个节点和78 101个四面体网格单元。为定量表征微散热器内部CF的取向状态, 在厚度中性面上各轮齿根部中央(即图中蓝色实心圆点在中性面上的投影)采集 a_{11} 值, 取其均值作为某条件下整个微散热器的 a_{11} 值, 即:

$$a_{11} = \sum_{i=1}^z \frac{(a_{11})_i}{z}. \quad (5)$$

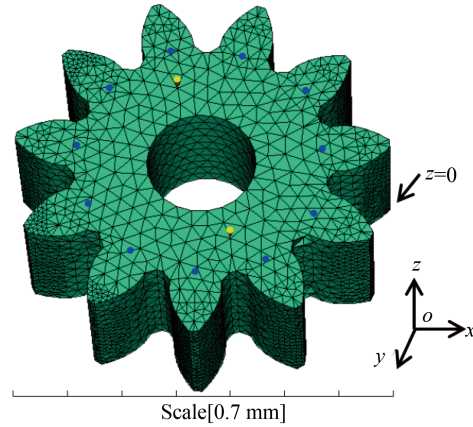


图2 微散热器的3D网格模型及数据采集点标识

Fig. 2 3D mesh model and sampling positions for the micro heat sink

2.3 数值预测方案设计

因微注塑成形过程的影响因素较多, 本文选用熔体温度、模具温度、最大注射压力和注射速率4个主要因素, 每个因素取3个水平值(见表1); 为以有限实验次数得到合理结果, 本文采用正交实验方案, 因而可得Moldflow仿真分析的9组具体条件(见表2)。

表1 考查因素及其水平

Tab. 1 Investigated factors as well as their levels

因素	水平1	水平2	水平3
熔体温度(T_m) [°C]	260	310	360
模具温度(T_{md}) [°C]	70	90	110
最大注射压力(P_m) [MPa]	180	220	260
注射速率(Q_m) [$\times 10^{-4}$ cm ³ /s]	2.0	2.5	3.0

本研究所用成形材料为高模量CF填充的聚酰胺PA66, PA66/CFs复合材料中CF的质量分数为30%。Moldflow仿真分析时, 直接采用复合材料的性能参数, 其不同温度下的流变性能如图3所示(来自Moldflow材料库), 其他特性参数为: 密度1.3 g/cm³, 热导率0.25 W/(m·K), 比热4400 J/(kg·°C)。进行Moldflow仿真分析时采用“填充”模式, 该模式包含前期以注射速率控制的“充模阶段”和后期以压力控制的“保压阶段”。现有研究表明, 微注塑“保压阶段”对熔体流场的影响较小^[14], 因此该阶段相关参数不作深入研究, 设置为保压时间10 s, 保压压力

表 2 基于正交设计的Moldflow仿真分析条件及结果

Tab. 2 Simulation conditions and results based on the orthogonal design

序号	T_{mt}	T_{md}	P_{in}	Q_{in}	a_{11}
①	1	1	1	1	0.367
②	1	2	2	2	0.436
③	1	3	3	3	0.492
④	2	1	2	3	0.767
⑤	2	2	3	1	0.457
⑥	2	3	1	2	0.572
⑦	3	1	3	2	0.728
⑧	3	2	1	3	0.747
⑨	3	3	2	1	0.712
K_{i1}	0.432	0.621	0.562	0.512	
K_{i2}	0.599	0.546	0.638	0.579	
K_{i3}	0.729	0.592	0.559	0.669	
R	0.297	0.075	0.079	0.157	
验证(⑩)					0.782

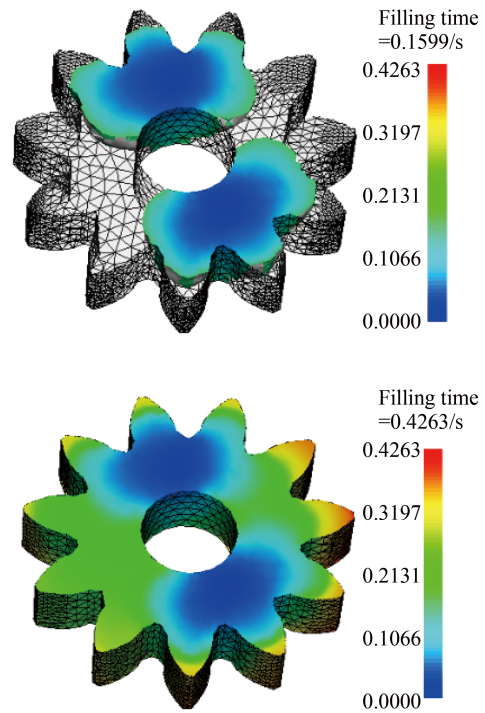


图 4 不同时刻微散热器体积

Fig. 4 Filled volumes at different time

恒为充填压力的80%(0.8p)。受仿真条件影响, Moldflow模型的计算时间在340~560 s(Intel CPU, 主

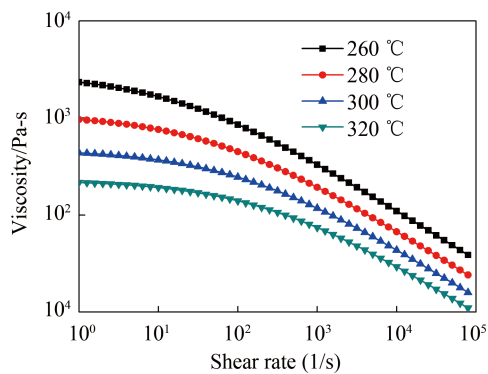


图 3 PA66/CFs复合材料的流变性能

Fig. 3 Rheological property of the PA66/CFs composite

频2.80 GHz, 内存4.0 GB)。

图4所示为Moldflow模拟过程中不同时刻微散热器的填充情况。当时间 $t=0.1599$ s时, 填充体积为49.8%; 当时间 $t=0.4263$ s时, 填充体积为100%。按上述正交设计完成全部模拟实验, 并依据式(5)计算 a_{11} 值。随后对实验数据进行极差分析, 以研究各参数重要程度及每个参数各水平的影响程度(结果如表2所示)。

表2中, K_{i1} , K_{i2} , $K_{i3}(i=T_{mt}, T_{md}, P_{in}, Q_{in})$ 分别表示某列所代表因素的1, 2, 3水平值所对应实验结果的平均值。当 i 值一定时, 通过比较上述3个平均值的大小可判断该因素的最优水平值; 表中 R 表示某列所代表因素 K_{i1} , K_{i2} , K_{i3} 的极值(即最大与最小值之差), 其值代表该因素的重要程度。

3 微观数值预测方法

根据前面所得各条件下CF的取向参数 a_{11} , 利用多物理场有限元软件Comsol Multiphysics建立PA66/CFs复合材料的微元胞, 其尺寸为 $1000 \text{ nm} \times 35 \text{ nm} \times 1000 \text{ nm}$, 按照宏观数值预测中所采用的30% (质量分数)填料含量计算, 复合材料微元胞中含9根 $\text{O}32 \text{ nm} \times 920 \text{ nm}$ 的CF, 其中CF轴线与 z 坐标的夹角可根据上一步所得取向参数 a_{11} 通过式(6)计算^[15]:

$$\theta = \arccos(\sqrt{a_{11}}). \quad (6)$$

可见, 式(6)建立了宏观和微观之间的桥梁, 从而实现本文提出的多尺度数值预测方法。图5中当 $a_{11}=0.71(\theta=32.4^\circ)$ 时微元胞的三维网格模型, 其中包含19.4万个有限元网格。

计算热导率时, 在Comsol Multiphysics中设置如下边界条件: ① z 方向上的其中一面施加热载荷

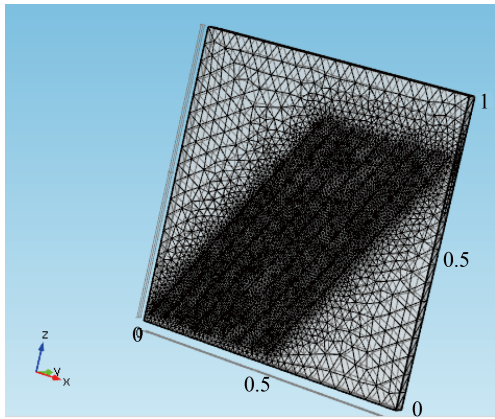


图 5 PA66/CFs 复合材料微元胞的三维网格模型

Fig. 5 3D mesh model of micro cell representing PA66/CFs composite

($T_{load}=51\text{ }^{\circ}\text{C}$); z 方向上另外一面为对流换热边界, 其换热系数为 $h_c=20\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 外界温度为 $T_{out}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
②元胞的其余 4 个表面为绝热边界条件。计算后获取 z 方向两个表面的温度差 ΔT 以及通过微元胞的热流量 J , 从而可根据式 (7) 获得复合材料的热导率:

$$k = \frac{J}{\Delta T / \Delta L}, \quad (7)$$

其中: ΔL 为 z 方向上两个表面的距离, 等于微元胞的高度 $1\ 000\ \text{nm}$ 。COMSOL 进行仿真分析时, 需要基体 PA66 和填料 CF 的独立性能参数, 设定值如下: PA66 的密度 $1.14\ \text{g}/\text{cm}^3$, 热导率 (k_0) $0.24\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 比热 $1\ 670\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{ }^{\circ}\text{C})$; CF 的密度 $2.1\ \text{g}/\text{cm}^3$, 热导率 $\{k_x, k_y, k_z\}=\{30, 30, 3\ 000\}\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 比热 $1\ 500\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{ }^{\circ}\text{C})$ 。COMSOL 模型的运算时间约为 $200\ \text{s}$ 。

图 6 所示为各成形条件下复合材料相对热导率 (k/k_0 , 为复合材料热导率与基体热导率之比) 的模拟结果, 为便于对比变化趋势, 图 6 同时给出了 Moldflow 模拟获取的 CF 取向参数 a_{11} 。

4 结果分析与讨论

4.1 各因素最优水平分析

CF 在聚合物基体中取向后, 一方面沿取向方向微散热器的导热性能得以提高; 另一方面大长径比 CF 填料的取向能诱导半结晶型聚合物基体 PA66 发生结晶, 提高其结晶度与取向度, 从而进一步提高微散热器的热导率。因此, CF 沿某一方向的取向值越大, 微散热器沿该方向的导热性能

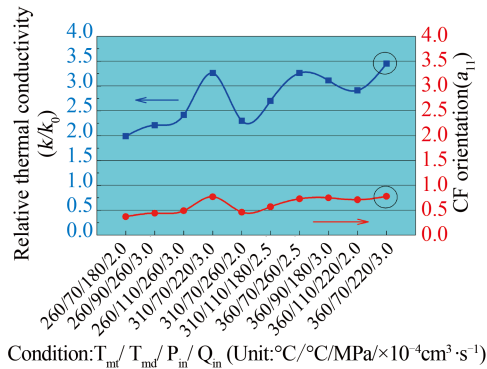


图 6 PA66/CFs 复合材料相对热导率及 CF 取向参数变化

Fig. 6 Variations in the relative thermal conductivity of PA66/CFs composites and CF orientation

越好。由表 2 可知, 熔体温度、模具温度、最大注射压力与注射流率所对应的最优水平分别为水平 3 (均值为 0.729)、水平 1 (均值为 0.621)、水平 2 (均值为 0.638) 和水平 3 (均值为 0.669)。因此, 可确定最优参数组合为 $T_{mt}3T_{md}1P_{in}2Q_{in}3$, 即: 熔体温度 $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、模具温度 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、最大注射压力 $220\ \text{MPa}$ 及注射流率 $3\times 10^{-4}\ \text{cm}^3/\text{s}$ 。应该指出, 由于正交法分析过程是基于本文特定注塑工艺参数范围 (表 1) 进行的, 因而该最优参数组合仅在本文所设定的参数范围内成立。

4.2 主次影响因素分析

由表 2 可知, 熔体温度、模具温度、最大注射压力与注射流率 4 个因素所对应的极差分别为 0.297 、 0.075 、 0.079 和 0.157 , 因此可确定各因素的影响重要程度次序为: 熔体温度 > 注射流率 > 最大注射压力 > 模具温度。该研究结果可作如下解释: 熔体温度对熔体流变性能的影响很大, 提高熔体温度能降低熔体黏度 (如图 3 所示), 改善熔体的流动性能, 进而提高 CF 在 PA66 基体中的活动取向能力; 此外, 注射流率与最大注射压力提高后, 熔体的流动能力及 CF 在 PA66 基体内的活动能力也能得到改善, 故可提高微散热器内 CF 的取向程度; 模具温度本应是影响熔体在微流道内流动的关键因素之一^[16], 但因为考查的是微散热器中性面上的 CF 取向, 且模具温度的变化范围较小, 故其作用并不明显。图 7 所示为选取的两种典型条件下 (对应模拟实验条件 ① 和 ⑥), 微散热器中性面上 CF 的取向情况。可见, 在各参数均取低值时 (模拟实验条件 ①), 总体上 CF 的取向值较低, 且分布极不均匀; 而当某些因素取值增大时, CF 的取向明显增

大, 且分布趋于均匀。当各参数均取低水平值时, 微散热器并未完全注满(即发生了短射), 而此时这些参数的取值均在Moldflow的推荐范围内, 这说明微注塑成形中各参数的取值均要高于普通注塑成形时的情形。

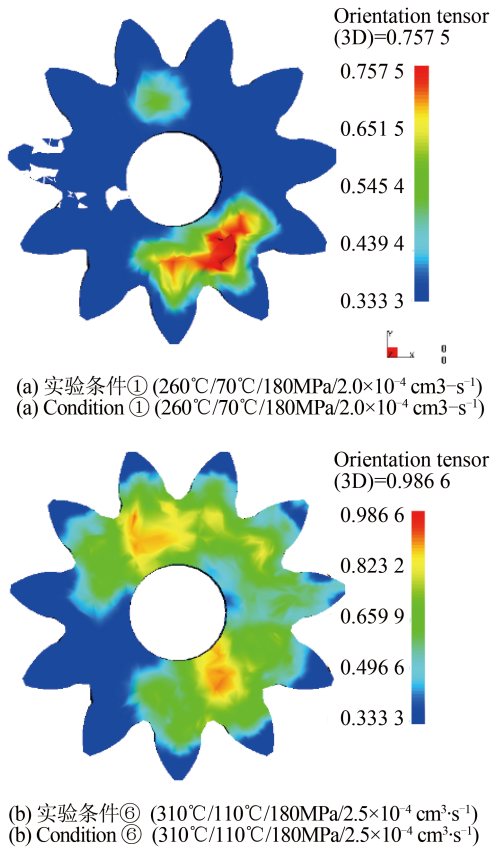


图7 不同条件下模拟实验结果的对比

Fig. 7 Comparison of the simulation results under different conditions

4.3 最优参数组合的验证实验

为进一步验证结果的正确性, 对上述最优参数组合进行验证实验。由于该组合所对应参数的取值并不在正交表中, 故应进行额外模拟实验验证, 采用的参数为: 熔体温度360°C、模具温度70°C、最大注射压力220 MPa及注射速率3×10⁻⁴ cm³/s。结果表明, 该条件下CF的取向值高于正交表中任一条件下的相应结果(见表2); 类似地, 该条件下所得复合材料的热导率也为所有条件中最高值(详见图6中带圆圈数值)。图8所示为该条件下微散热器中性平面内各处的CF取向分布。其中, 两浇口位置(白色圆圈标示)处, CF取向度显示高值, 这是因为浇口尺寸小、熔体所受剪切速率

高, 有利于纤维状填料取向; 而与两浇口连线垂直处内侧为CF取向低数值区, 这是由于来自两浇口的熔体在此处交汇而形成紊流, 造成CF沿平面取向度的降低; 各轮齿顶部部位则因熔体流速很低而CF取向非常有限; 其余部位CF取向分布较均匀, 且数值普遍较高, 表明该成形条件下获取的微散热器具有较高的径向导热性能。

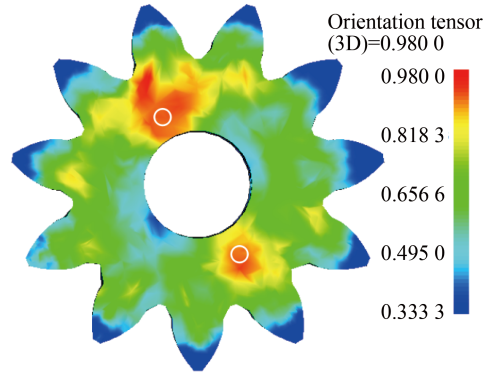


图8 验证模拟实验结果

Fig. 8 Validation of simulation results

4.4 热导率与CF取向之间的关系

由图6可见, 复合材料的热导率与填料CF的取向参数值(a_{11})具有相同的变化趋势, 两者成正相关关系。复合材料的相对热导率随工艺参数组合发生明显变化, 这是由不同条件下微散热器内部CF的取向度不同所致。优化后复合材料的相对热导率达到3.5(即为基体热导率的3.5倍), 对应的热导率值为0.84 W/(m·K)。考虑到在所考查工艺参数范围内复合材料的相对热导率最小值为2.0(在条件①下取得), 可知由微注塑过程中熔体流动诱导的相对热导率最大变化量为1.5, 即为聚合物基体热导率的1.5倍, 对应于0.36 W/(m·K)的变化量。可见, 虽然材料体系及其配比保持不变, 但聚合物复合材料制品在成形过程中由于受到不同程度的拉伸与剪切流场的作用而导致填料(尤其是大长径比填料)的定向排列, 进而显著地改变了材料的导热性能。该研究结果为从成形工艺调控的新角度改善聚合物复合材料的热导性能乃至其他性能提供了理论支撑。

5 结论

本文对齿轮形聚合物复合材料微散热器流动诱导的热导率变化进行了多尺度数值预测。研究结果表明: 对于所考查因素, 按其对于复合材料微散

热器热导率的影响重要程度由大到小排序为熔体温度、注射流率、最大注射压力、模具温度。同时,借助正交实验法获得各因素最佳组合为熔体温度360℃、模具温度70℃、最大注射压力220 MPa及注射流率 $3 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$ 。此外,由注塑过程中流动诱导的复合材料热导率变化最大值为0.36

W/(m·K),达到基体材料热导率的1.5倍。应该指出,本文多尺度数值预测过程中对复合材料模型及流动中CF间的相互作用作了近似处理。本文研究结果为注塑法获取高导热聚合物复合材料微制品提供了理论基础,同时也为用其他成形方法获取高性能聚合物复合材料制品提供了借鉴。

参考文献:

- [1] 张冬至. 静电诱导自组装碳纳米管薄膜的结构表征与电学性能[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1562-1570.
ZHANG D ZH. Structure characterization and electric properties of electrostatic-induced self-assembly carbon nanotube films[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1562-1570. (in Chinese)
- [2] YANG C, YIN X H, CHENG G M. Microinjection molding of microsystem components: New aspects in improving performance[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, 23 (9): 093001.
- [3] 刘汉, 吴宏武. 填充型导热高分子复合材料研究进展[J]. 塑料工业, 2011, 39(4): 10-13.
LIU H, WU H W. Research progress of thermal conductive polymer composites with fillers[J]. *China Plastics Industry*, 2011, 39(4): 10-13. (in Chinese)
- [4] 马雅丽, 刘文开, 刘冲, 等. UV-LIGA技术在制作细胞培养器微注塑模具型腔中的应用[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1228-1233.
M A Y L, LIU W K, LIU CH, *et al.*. Application of UV-LIGA technology to machining micro-injection mold cavity of cell culture device[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1228-1233. (in Chinese)
- [5] MORISHITA T, MATSUSHITA M, KATAGIRI Y, *et al.*. A novel morphological model for carbon nanotube/polymer composites having high thermal conductivity and electrical insulation[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, 21(15): 5610-5614.
- [6] TENG C C, MA C C M, CHIOU K C, *et al.*. Synergetic effect of thermal conductive properties of epoxy composites containing functionalized multi-walled carbon nanotubes and aluminum nitride[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(2): 265-271.
- [7] PAK S Y, KIM H M, KIM S Y, *et al.*. Synergistic improvement of thermal conductivity of thermoplastic composites with mixed boron nitride and multi-walled carbon nanotube fillers[J]. *Carbon*, 2012, 50(13): 4830-4838.
- [8] MARCONNET A M, YAMAMOTO N, PANZER M A, *et al.*. Thermal conduction in aligned carbon nanotube-polymer nanocomposites with high packing density[J]. *ACS Nano*, 2011, 5(6): 4818-4825.
- [9] 钟金明, 伍晓宇, 徐斌, 等. 线切割与真空热扩散焊组合工艺制备微模具[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 988-995.
ZHONG J M, WU X Y, XU B, *et al.*. Laminated fabrication of micro-mold based on WEDM and thermal diffusion welding[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 988-995. (in Chinese)
- [10] LIU F, GUO C, WU X, *et al.*. Morphological comparison of isotactic polypropylene parts prepared by micro-injection molding and conventional injection molding[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2012, 23(3): 686-694.
- [11] 密亚男. 高导热氮化铝—碳纳米管/聚合物基复合材料的研究[D]. 江苏: 苏州大学, 2013.
Mi Y N. *High Thermal Conductivity Aluminum Nitride-multiwalled Carbon Nanotube/Cyanate Ester Composites*[D]. Jiangsu: Soochow University, 2013. (in Chinese)
- [12] KARKRI M, IBOS L, GARNIER B. Comparison of experimental and simulated effective thermal conductivity of polymer matrix filled with metallic spheres: Thermal contact resistance and particle size effect[J]. *Journal of Composite Materials*, 2015, 49(24): 3017-3030.
- [13] NOH Y J, KIM S Y. Synergistic improvement of thermal conductivity in polymer composites filled with pitch based carbon fiber and graphene nanoplatelets[J]. *Polymer Testing*, 2015, 45: 132-138.
- [14] SHA B, DIMOV S, GRIFFITHS C, *et al.*. Micro-injection moulding: Factors affecting the achievable aspect ratios[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing*

Technology, 2007, 33(1-2): 147-156.

- [15] VINCENTA M, GIROUDA T, CLARKEB A, *et al.*. Description and modeling of fiber orientation in injection molding of fiber reinforced thermoplastics[J]. *Polymer*, 2005, 46: 6719-6725.

- [16] YANG C, LI L, HUANG H X, *et al.*. Replication characterization of microribs fabricated by combining ultraprecision machining and microinjection molding[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2010, 50 (10): 2021-2030.

作者简介:



杨 灿(1982-), 男, 广东河源人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 分别于2006年和2011年获得华南理工大学学士学位和博士学位(硕博连读), 2008年10月~2010年09月赴美国俄亥俄州立大学访问研究, 现主要从事聚合物成型加工装备、工艺及数值模拟, 智能聚合物材料及器件等方面研究。

Email: yc2011@zjnu.cn



曹泽卫(1994-), 男, 浙江杭州人, 机械设计制造及其自动化专业本科生。

Email: 349560904@qq.com



尹晓红(1985-), 女, 浙江永康人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 2006年、2011年于合肥工业大学分别获得学士、博士学位(硕博连读), 主要从事精密机械自动化、智能控制、移动机器人和无人驾驶车控制等方面研究。

Email: yxh4609@zjnu.cn



阚君武(1965-), 男, 吉林榆树人, 教授, 博士生导师, 1991年、2000年于吉林工业大学分别获得学士学位、硕士学位, 2003年于吉林大学获得博士学位, 2005年中科院长春光机所博士后出站, 主要从事压电驱动器, 能量回收、精密机械等方面研究。

Email: jutkjw@yahoo.com.cn



程光明(1957-), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 1982年、1985年和1996年于吉林工业大学分别获得学士、硕士和博士学位, 主要从事压电驱动与控制技术及微小型机电液系统等方面的研究。

Email: cgm123@163.com