

注射成型纤维取向模拟及实验验证*

郭胜立 卢关涛 孔令超 梁本亮 刘保臣

(郑州大学材料科学与工程学院,郑州 450002)

摘要 通过实验分析了短纤维增强复合材料注射成型标准试样中的纤维取向分布,并与 Moldflow 模拟结果进行了对比。结果表明,注塑试样标定段具有分层取向结构,表层沿流动方向取向强烈,过渡层取向程度下降,但仍为平面取向,芯层则表现为三维取向分布。Moldflow 模拟结果与实验结果对比表明,模拟结果高估了芯层的取向程度。

关键词 短纤维增强复合材料 注射成型 纤维取向

短纤维增强复合材料由于具有较高的比强度、比刚度以及易于成型等优点在工业中得到了广泛应用。由于成型条件、制品形状、模具结构以及材料组分不同,制品中形成了不同的纤维取向结构,造成材料的各向异性,从而影响制品的力学性能和使用性能。为了缩短产品试制周期和降低生产成本,实现复合材料的可设计性,纤维取向模拟和材料性能预测一直是短纤维增强复合材料领域研究的热点。

纤维取向结构是影响复合材料力学性能的主要因素,对纤维取向结构的描述主要有取向因子法、取向分布函数法和取向张量法^[1]。取向因子法由于难以和成型过程建立联系,因此在纤维取向模拟中很少采用,主要应用于力学性能预测;取向分布函数法虽然最为完整地描述了纤维取向信息,但由于计算量过于庞大,限制了其在注射成型纤维取向模拟中的应用;纤维取向张量以取向分布函数的形式描述纤维取向状态,可以将成型过程和纤维取向以及制品力学性能结合在一起,具有简洁、运算量小等优点,因此在纤维取向模拟和力学性能预测方面得到了广泛的应用^[2-4]。注射成型中形成的纤维取向多层结构对试样力学性能有显著的影响,为了全面分析纤维取向对复合材料性能的影响,定量确定试样中的纤维取向结构十分有必要。笔者通过实验分析了标准试样中的纤维取向分布,并与 Moldflow 模拟结果进行了对比。

1 理论分析

1.1 纤维取向分析模型

Jeffery 在只考虑黏性力的条件下,建立了单个刚性椭球粒子在牛顿流体中的旋转运动方程。以此为基础,广大学者对注射成型中的纤维取向进行了研究,其中 F. Folgar 和 C. C. Tucker 在 Jeffery 方程的基础上引入纤维相互作用项用于描述非稀溶液流动过程中的纤维取向行为^[2],由于该模型能更真实

地描述工程材料,因而成为注射成型纤维取向模拟的标准方程,其二阶取向张量演化方程为:

$$\frac{D\alpha_{ij}}{Dt} = -\frac{1}{2}(\omega_{ik}\alpha_{kj} - \alpha_{ik}\omega_{kj}) + \frac{1}{2}\lambda(\gamma_{ik}\alpha_{kj} + \alpha_{ik}\gamma_{kj} - 2\gamma_{kl}\alpha_{ij}) + 2C_l\gamma(\delta_{ij} - 3\alpha_{ij}) \quad (1)$$

式中: $\omega_{ij} = \mu_{j,i} - \mu_{i,j}$; $\gamma_{ij} = \mu_{j,i} + \mu_{i,j}$; $\gamma = \sqrt{\frac{1}{2}\gamma_{ij}\gamma_{ji}}$; $\lambda = \frac{r_e^2 - 1}{r_e^2 + 1}$; $r_e = \frac{L}{D}$; $\frac{D}{Dt}$ 是物质导数; α, ω, γ 分别为纤维取向张量、旋度张量和形变率张量; δ 为单位张量; u 为速度矢量; i, j, k, l 为各张量分量下标符号; λ 为纤维形状因子; r_e 是纤维形态比; C_l 是纤维相互作用系数,与材料性质有关。

由方程(1)可看出,纤维取向张量随时间的演化与流场有关,因此需要求解注塑填充过程的速度场和温度场。

1.2 注塑充填过程控制方程

由于注塑制品一般为薄壁制件,其充填过程可简化为非牛顿流体在非等温条件下的广义 Hele-Shaw 流动,采用合理的假设和适当的边界条件,得到充填过程的压力控制方程和能量方程分别为:

$$\frac{\partial}{\partial x_1}(s \frac{\partial P}{\partial x_1}) + \frac{\partial}{\partial x_2}(s \frac{\partial P}{\partial x_2}) = 0 \quad (2)$$

$$\rho c_p (\frac{\partial T}{\partial t} + u_1 \frac{\partial T}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial T}{\partial x_2}) = k \frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2} + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (3)$$

式中: $s = \int_0^H \frac{x_3^2 dx_3}{\eta}$; P 为压力; η 是熔体粘度; ρ 为熔体密度; c_p 为定压比热; k 是导热系数; T 为温度; t 为时间; u_1, u_2 分别为沿坐标轴 x_1, x_2 方向的速度分量; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。

对非牛顿流体,粘度是剪切速率和温度的函数,

*教育部大学生创新实验项目(091045907)

收稿日期:2011-04-11

用 Cross 模型表示为:

$$\eta = \frac{\eta_0(T)}{1 + [\frac{\eta_0(T)\dot{\gamma}}{\tau}]^{1-n}}$$

(4)

粘度对温度的依赖性由式(5)来描述:

$$\eta_0(T) = \eta^* \exp[-\xi(T - T_0)]$$

(5)

式中: η^* 、 ξ 、 T_0 和 n 是与材料有关的常数。

1.3 闭合近似模型

在二阶取向张量演化方程(1)中,包含有四阶取向张量 α_{ijkl} ,为求解方程,需要用二阶张量代替四阶张量,即闭合近似问题。在当前采用的闭合近似模型中,线性闭合近似对完全随机取向是精确的;二次闭合近似适用于完全取向状态;混合近似模型采用加权系数对完全随即取向和单向取向两种情况进行了加权平均,是当前纤维取向模拟中通常采用的闭合近似模型,但求解精度较差;正交线性、二阶和三阶闭合近似模型在拟合时加入了更多流场,精度有所提高^[5]。

在求解以上方程时,首先采用有限元/有限差分/控制体积法求解充填控制基本方程,即在流动平面内将未知变量(如压力 P , 温度 T)用有限元法进行离散,在厚度方向上采用有限差分法进行离散,熔体前沿的更替采用控制体积法来实现。采用与充填过程相同的有限元和有限差分网格,利用充填分析结果可以求解纤维取向张量演化方程。

2 实验部分

2.1 原材料

等规聚丙烯:iPP F401,熔体流动速率为 2.5 g/10 min(190℃,21.6 N),兰州石化公司;

无碱玻璃纤维:EC11-1200W,陕西华特玻纤有限公司。

2.2 仪器、设备

同向双螺杆挤出机:SHJ-20 型,南京杰恩特机电有限公司;

注塑机:HTF80B-W2 型,宁波海天股份有限公司;

偏光显微镜:BX61 型,日本奥林巴斯公司。

2.3 试样制备

采用双螺杆挤出机混合造粒,其中聚丙烯从主加料口加入,连续纤维从第一排气口加入;从加料段到机头的温度依次为 130、140、160、180、200、185℃;主螺杆转速为 80 r/min。

采用注塑机制备试样,试样及浇注系统结构如

图 1 所示。从加料端到喷嘴温度依次为 170、190、230、210℃,模具温度为 70℃,注塑压力为 65 MPa,保压压力和时间分别为 50 MPa 和 10 s,注塑时间为 2 s,冷却时间为 30 s。

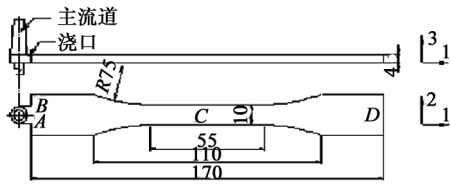


图 1 试样及浇注系统结构

如图 1 所示,在 A、B、C、D 四个位置截取试样并用 1-2 截面抛光,在 C 位置用 2-3 截面抛光,其中 1 方向为熔体充填时的流动方向,2 方向垂直于流动方向,3 方向为试样厚度方向。在制取试样时,先切割试样进行包埋处理,然后依次采用 200、400、600、800、1000 号金相砂纸打磨试样表面,最后用 0.5 μm 金刚石研磨膏和丝织物抛光布进行抛光。

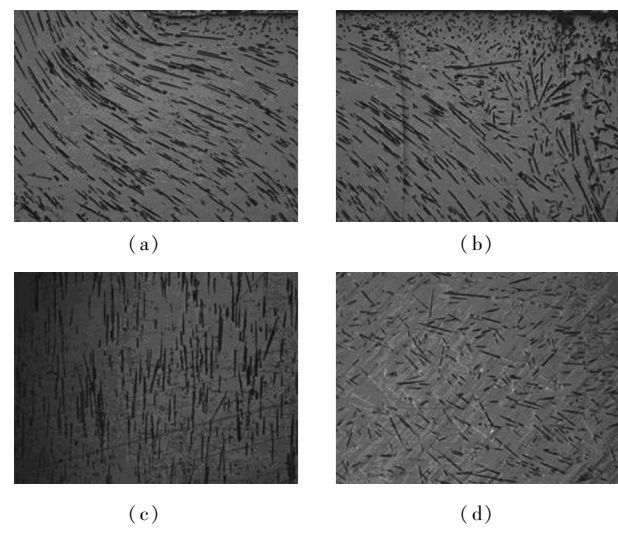
2.4 性能测试

试样抛光后采用氢氟酸(分析纯)对表面处理 3 min,玻璃纤维被腐蚀后形成孔洞。试样腐蚀后放在偏光显微镜下进行观察照相。

3 结果与讨论

3.1 实验结果

图 2 为试样沿厚度方向距离试样表面 0.5 mm 处 A、B、C、D 四个位置在流动平面(1-2 截面)内的纤维取向分布。总体来看,纤维在该平面内近似呈平面取向分布,但各处由于条件不同又各有特点:在位置 A 处(图 2a),熔体从狭窄的浇口进入宽阔的型

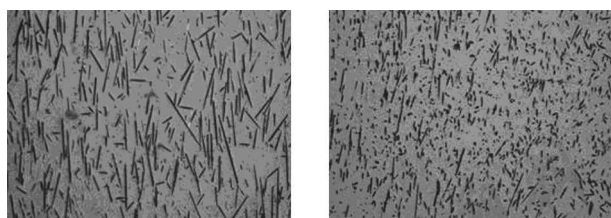


a、b、c、d—A、B、C、D 四个位置纤维取向分布

图 2 不同位置距离试样表面 0.5 mm 处流动平面纤维取向分布

腔形成分散流,纤维沿流动方向取向;在位置 B 处(图 2b),由于形成了局部涡流,使得纤维在该处呈现杂乱取向;在位置 C 处(图 2c),熔体经过充分发展形成为均匀稳定的一维流动,纤维沿流动方向强烈取向;在位置 D 处(图 2d),由于流动前沿“喷泉流”效应,在该处纤维呈现杂乱取向,且更多的倾向于垂直流动方向。

图 3 为试样标定段位置 C 处沿厚度方向距离试样表面 1.0、2.0 mm 处流动平面内的纤维取向分布。在距离试样表面 1.0 mm 处(图 3a),由于剪切速率的下降,与 0.5 mm 处相比(图 2c),纤维取向程度明显减弱,但仍然近似为平面取向;在距离试样表面 2.0 mm 处(图 3b),由于剪切速率近似为 0,且熔体流动速度最高,纤维取向呈现三维取向分布。



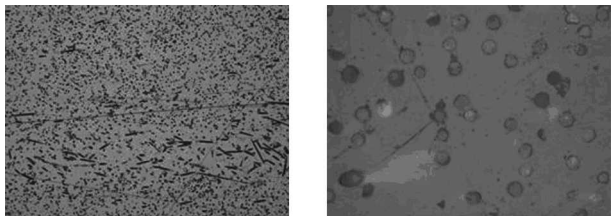
(a)

(b)

a,b—距离试样表面 1.0、2.0 mm 处的截面

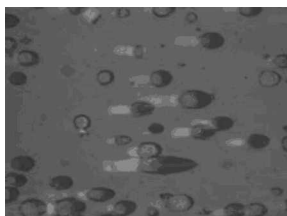
图 3 位置 C 处流动平面内纤维取向分布

图 4 为 C 处垂直于流动方向(2-3 截面)的纤维取向照片。整体来看,纤维取向分布具有明显的分层取向结构(图 4a);在距离试样表面 0.5 mm 处(图 4b),纤维截面近似为圆形,说明纤维主要沿流动方向取向,这与图 2c 观察到的结果一致;在距离试样表面 1.0 mm 处(图 4c),纤维截面更多的是椭圆形,且椭圆长轴与 2 轴方向一致,说明在该位置纤维

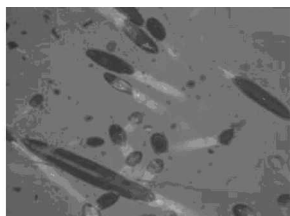


(a)

(b)



(c)



(d)

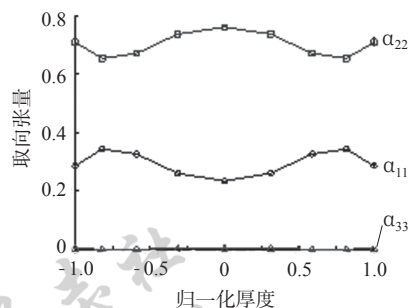
a,b,c,d—沿厚度整体截面,0.5、1.0、2.0 mm 处的截面图像

图 4 位置 C 处垂直于流动方向的截面图像

纤维取向程度下降,且近似为平面取向分布,这与图 3a 观察到的结果一致;在距离表面 2.0 mm 处,纤维截面大多数为椭圆,且椭圆长轴与 2 轴有较大的夹角,纤维呈现三维取向分布,这与图 3b 观察到的结果一致。

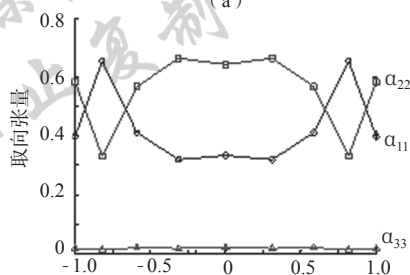
3.2 模拟结果

图 5 是采用 Moldflow 软件分析得到的 A 、 B 、 C 、 D 四个位置沿厚度方向的纤维取向张量结果。



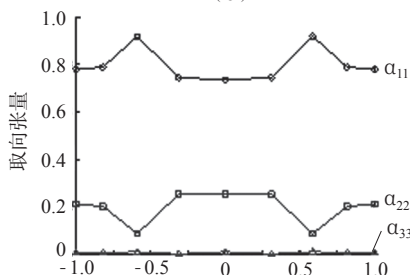
归一化厚度

(a)



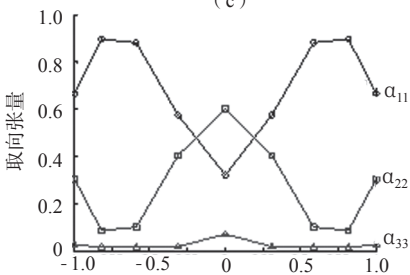
归一化厚度

(b)



归一化厚度

(c)



归一化厚度

(d)

a,b,c,d— A 、 B 、 C 、 D 四个位置归一化厚度上的取向张量

图 5 Moldflow 模拟结果

分析时采用中面模型,共包含 5900 个单元网

格,纤维相互作用系数 C_f 取 0.001,采用正交三阶拟合闭合近似模型(Orthotropic 3),工艺条件按照实验条件设定。由图 5a 可看出,在 A 位置整个厚度方向上张量分量 α_{22} 均大于 α_{11} ,表明在该处纤维倾向于沿 2 方向取向,这是因为浇口处熔体为发散流,纤维沿流动方向取向,这与图 2a 观察到的现象一致。由图 5b 可看出,张量分量 α_{11} 、 α_{22} 相差不大,这是因为局部涡流形成的纤维取向近似为随机分布。由图 5c 可看出, α_{11} 远大于 α_{22} ,且在次表层 α_{11} 在 0.9 以上,说明纤维主要沿 1 轴方向取向,这与实验观察到的结果一致,但中心层 α_{11} 在 0.8 左右,表明该处取向依然强烈,这与实验观察到的中心层为三维取向的结果差距较大。由图 5d 可看出,在 D 位置,模拟结果显示出皮-芯层取向结构,在次表层 α_{11} 接近 0.9,表明纤维主要沿 1 轴取向,这与实验结果有较大差距;中心层 α_{11} 、 α_{22} 大小相当,在 0.5 左右,为平面随机取向分布,这与实验结果基本一致。

4 结语

对注射成型试样,由于流场的变化造成各部位

纤维呈现不同的纤维取向结构,在试样标定段由于流场经过充分发展,具有相似的分层取向结构:表层纤维取向强烈,近似为单一取向,次表层纤维取向程度下降,但仍然表现为平面取向分布,芯层则具有三维取向结构。通过对比实验结果与 Moldflow 模拟结果表明,模拟结果高估了芯层的取向程度。

参考文献

[1] Advani S G, Tucker C L. The use of tensors to describe and predict fibre orientation in short fibre composites[J]. J Rheol,1987, 31(8):751-784.

[2] Folgar F, Tucker C L. Orientation behavior of fibers in concentrated suspensions[J]. J Reinf Plast Compos,1984(3):98-119.

[3] Mlekusch B. Thermoelastic properties of short-fibre-reinforced thermoplastics[J]. Compos Sci Techn,1999,59:911-923.

[4] Han K H, Im Y T. Numerical simulation of three-dimensional fiber orientation in short-fiber-reinforced injection-molded parts [J]. J Mater Process Techn,2002,124:366-371.

[5] Chuang D H, Kwon T H. Improved model of orthotropic closure approximation for flow induced fiber orientation[J]. Poly Comp, 2001,22(5):636-649.

SIMULATION AND EXPERIMENT VERIFICATION OF FIBER ORIENTATION IN INJECTION MOLDING

Guo Shengli, Lu Guantao, Kong Lingchao, Liang Benliang, Liu Baochen

(School of Material Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

ABSTRACT Fiber orientation distribution of injection-molded test sample was simulated by Moldflow and the results were verified. The results showed that a multi-layer orientation structure of injection-molded sample occurred in the demarcate position. Fibers aligned strongly parallel to flow direction in skin layer, no preferred orientation in transition layer and three-dimension orientation in core layer. By comparison with experiment, the simulation results by Moldflow overestimated the fiber alignment in the core layer.

KEYWORDS short fiber reinforced plastics, injection molding, fiber orientation

朗盛研发应用于卡车的 PBT 混合物

朗盛为大型卡车外部组件研发了一种新的产品——PocanC1202,它是聚对苯二甲酸丁二酯和聚碳酸酯(PBT/PC)的混合物。该产品被用于生产 FM 系列 FMX 建筑卡车的无涂层格栅,其配备了沃尔沃卡车公司专门针对恶劣的建筑工地运行条件而开发的全新前端截面。

该格栅是一个面积很大的注塑部件。因此,相关模具采用多级注塑技术进行填充。卡扣和卡座也可以牢固地复制在流动路径的末尾。此外,优良的流动性仅产生最低限度的变形,并确保精细的皮纹图案得以精确复制。除出色的加工性能外,该材料还可以轻松脱模并具有较低的收缩率。为了削减成本,格栅不需喷涂。PBT 混合物符合沃尔沃标准的紫外线稳定性要求并具有良好的耐化学药品性,该材料还对车辆每天遇到的情况具有良好的抵抗力。

该材料可以为组件提供具有细纹图案的高耐候性优质

表面,且无需涂敷涂层。此外,该材料还具有极高的韧性,使格栅可以耐受石屑和其它机械应力。(中聚网)

日本东丽增加聚苯硫醚产能

日本东丽将在其位于爱知县东海市的东海工厂增设年产量 5000 t 的聚苯硫醚(PPS)树脂生产设备,争取 2013 年 1 月投产。由此,东海工厂的 PPS 年产能将提高至 19000 t。为了应对日益扩大的 PPS 需求,该公司将考虑继续增产。

日本媒体报道,为了扩大 PPS 业务,东丽打算通过增产来建立稳定的供应体制,主要面向环保产品及节能产品开拓新用途。在汽车领域,伴随着汽车的 HEV(混合动力车)及 EV(电动汽车)化,以逆变器及马达用途为代表,PPS 在轻量化及支持汽车电子化的电子部件方面的需求会不断扩大。在电气电子设备及住宅设备领域,PPS 的用途正在扩大至个人电脑的机构部件、机壳、电容器部件及热水器阀门等。

(工塑)