第 16 卷 第 3 期 复 合 材 料 学 报 Vol. 16 No. 3
1999 年 8 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA August 1999

# 纤维增强塑料注塑成型集成仿真建模

林兰芬 董金祥
(浙江大学人工智能研究所, 杭州 310027)

**摘 要** 注射成型过程中的熔体流动分析、纤维断裂和纤维取向预测紧密相关, 并且具有重要的工程应用价值, 因此对其进行集成仿真是十分有意义的。本文在分析各自特点的基础上, 提出注塑流动、纤维断裂和纤维取向集成仿真模型, 可对充填和后充填阶段的可压缩流体的非对称流动, 以及由于熔体流动引起的纤维断裂、三维纤维取向行为进行统一建模, 并且熔体流动和纤维取向相互耦合。

**关键词** 注射成型, 熔体流动, 纤维断裂, 纤维取向, 仿真
**中图分类号** TP391.9, O242.1

建立合适的描述熔体流动和纤维运动的模型是纤维增强塑料注射成型仿真的关键。现有的仿真模型可对熔体充填流动以及由于熔体充填流动引起的纤维取向进行建模, 但是存在以下几个问题: 首先是局限于熔体的充填阶段, 其次往往不考虑纤维取向对熔体流动的影响, 熔体流动仿真和纤维取向预测二者相互独立, 另外不能反映成型过程中的纤维断裂行为[1,2]。

鉴于上述情况, 本文首先阐述了集成仿真熔体流动、纤维断裂和纤维取向的出发点。在分析各自特点的基础上, 提出熔体流动、纤维断裂和纤维取向集成仿真模型, 可对充填和后充填阶段的可压缩流体的非对称流动, 以及由于熔体流动引起的纤维断裂、三维纤维取向行为进行统一建模, 并且熔体流动和纤维取向相互耦合。

## 1 熔体流动、纤维断裂和纤维取向集成仿真提出

注射成型是一种高效的纤维增强塑料制件的加工方法。然而在成型过程中, 不可避免地存在下述问题, 即不合理的产品设计、模具设计和成型工艺参数, 由此导致非均匀充填流动、不恰当的熔接线位置、气穴和充填不足等成型缺陷; 纤维断裂和纤维取向, 使得成型后注塑件中的纤维长度显著减小, 纤维取向无法控制, 严重地影响了纤维增强塑料制件的性质, 所有这些都制约了这种成型技术的广泛应用。

若能对纤维增强塑料熔体流动以及增强纤维的断裂和取向进行分析, 预测成型过程中熔体充填流动模式、压力场、温度场和速度场的动态变化, 预测最终制件中的纤维长度和取向分布, 则不仅可以为工程人员进行产品设计、模具设计和优化工艺参数提供重要的依据, 而且尤其重要的是, 可以建立注射成型工艺与最终制件中的纤维长度、取向之间的定量关系, 从而通过设计或控制成型过程, 就能获得高质量、高性能的纤维增强注塑件。

收修改稿、初稿日期: 1998-04-27, 1998-02-02。浙江省自然科学基金资助项目(No. 698026)

实验研究表明, 流体变形引起的应力使其中的纤维发生断裂[3], 这样对于纤维增强塑料注射成型, 若不考虑纤维在注塑机料筒中的行为, 则充填和保压阶段的熔体流动应是纤维断裂的主要原因。

注射成型过程中的纤维取向机理已众所周知, 即熔体充填型腔的流动引起了纤维取向, 保压阶段的流动则轻微地改变了由充填流动引起的纤维取向, 因此充填和后充填阶段(主要是保压阶段)的熔体流动均影响了增强纤维的取向。

此外, 由于纤维存在和取向, 不仅改变了熔体的流动类型, 而且使纤维增强塑料熔体的本构方程发生变化, 因此流动仿真应该与纤维取向预测相互耦合, 并且应考虑上述耦合因素。

综上所述, 熔体流动、纤维断裂和纤维取向三者密切相关, 并且熔体流动仿真、纤维断裂和纤维取向预测可以为制造高质量的纤维增强注塑件提供技术保证, 具有重要的工程应用价值。因此集成仿真熔体流动、纤维断裂和纤维取向是十分有意义的。

## 2 集成仿真模型

熔体流动、纤维断裂和纤维取向集成仿真模型由三部分组成, 分别为熔体流动仿真模型、纤维取向预测模型和纤维断裂预测模型。下面依次对这三部分进行阐述。

### 2.1 熔体流动仿真模型

熔体流动模型的建立基于流体力学的基本方程, 包括连续性方程、动量方程和能量方程。文献中, 研究人员已提出了不同复杂程度的模型。本文对 Chiang 等人提出的充填和后充填阶段统一仿真模型[4]进行推广, 以适应集成仿真的需求。

为了仿真熔体流动和纤维取向的耦合关系, 选择合适的本构方程十分重要。在众多的流体力学本构方程中, Dinh-Armstrong 模型是一种适合于半浓悬浮液, 即纤维之间的平均距离介于其直径和长度之间的流变学模型, 因此可以用来描述工程实用的纤维增强塑料熔体的流变学行为, 其具体形式为

$$S_j = G(u_{i,j} + u_{j,i}) + G\frac{PnL^3}{6\ln(2h/D)}u_{k,l}a_{ijkl} \tag{1}$$

式中, $S_j$ 为应力张量, G为粘性系数, $u_{i,j}=\frac{5u_i}{5x_j}$为速度梯度张量, n 为单位体积所含纤维数目, L, D 分别为纤维长度和直径, $a_{ijkl}$为四阶纤维取向张量, h 为给定纤维和其最近纤维之间的平均距离, 且

$$h = \begin{cases} (nL)^{-1/2} & \text{完全取向} \\ (nL^2)^{-1} & \text{随机取向} \end{cases} \tag{2}$$

对于薄壁型腔中的熔体流动, 由于厚向速度分量为 0, 且其它速度分量沿厚向的变化远大于流动平面内的变化, 因此方程(1)可以简化为

$$S_{A3} = Gu_{A3} + G\frac{PnL^3}{6\ln(2h/D)}(u_{1,3}a_{A313} + u_{2,3}a_{A323}) \quad (A=1,2) \tag{3}$$

利用上述本构方程和适用于注射成型中熔体流动的基本假设, 则连续性方程、动量方程和能量方程可简化为

$$\frac{5\ln Q}{5t} + \frac{5u}{5x} + \frac{5v}{5y} = 0 \tag{4}$$

$$0 = -\frac{5p}{5x} + \frac{5}{5z}[G\frac{5u}{5z} + GN(\frac{5u}{5z}a_{1313} + \frac{5v}{5z}a_{1323})] \tag{5}$$

$$0 = -\frac{5p}{5y} + \frac{5}{5z}[G\frac{5v}{5z} + GN(\frac{5u}{5z}a_{2313} + \frac{5v}{5z}a_{2323})] \tag{6}$$

$$QC_P\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q\dot{\gamma}^a \tag{7}$$

式中, u, v 为沿 x, y 坐标方向的速度分量, p 为压力, $N=G\frac{PnL^3}{6\ln(2h/D)}$, T 为温度, t 为时间, Q、$C_P$, K 分别为熔体的密度、比热和热传导系数, $\dot{\gamma}^a$为剪切速率。

考虑到流体沿模具壁无滑动以及非对称的模具冷却, 则速度和温度边界条件分别为:

$$\text{在 } z=b \text{ 处}\qquad u=v=0,\ -K\frac{\partial T}{\partial n}=h_c(T-T_w^+) \tag{8}$$

$$\text{在 } z=-b \text{ 处}\qquad u=v=0,\ -K\frac{\partial T}{\partial n}=h_c(T-T_w^-) \tag{9}$$

式中, b 为型腔半厚度, $-K\frac{\partial T}{\partial n}$是热通量( n 为法线方向) , $h_c$ 为模具和熔体界面之间的热传导, $T_w^+$、$T_w^-$ 为模具正、负壁的温度。

将方程( 5) 和( 6) 沿厚度方向积分, 利用四阶取向张量的对称性, 通过联立求解可得

$$\frac{\partial u}{\partial z}=\frac{(z-z_0)}{G}\left(\frac{\partial p}{\partial x}-N_{xx}\frac{\partial p}{\partial x}-N_{xy}\frac{\partial p}{\partial y}\right) \tag{10}$$

$$\frac{\partial v}{\partial z}=\frac{(z-z_0)}{G}\left(\frac{\partial p}{\partial y}-N_{xy}\frac{\partial p}{\partial x}-N_{yy}\frac{\partial p}{\partial y}\right) \tag{11}$$

式中, $z_0$ 是$\frac{\partial u}{\partial z}=\frac{\partial v}{\partial z}=0$ 处的 z 值,

$$N_{xx}=\frac{Na_{1313}(1+Na_{2323})-N^2a_{1323}^2}{(1+Na_{1313})(1+Na_{2323})-N^2a_{1323}^2} \tag{12}$$

$$N_{yy}=\frac{Na_{2323}(1+Na_{1313})-N^2a_{1323}^2}{(1+Na_{1313})(1+Na_{2323})-N^2a_{1323}^2} \tag{13}$$

$$N_{xy}=\frac{Na_{1323}}{(1+Na_{1313})(1+Na_{2323})-N^2a_{1323}^2} \tag{14}$$

利用边界条件( 8) 和( 9) , 将方程( 10) 和( 11) 沿厚度方向积分, 并且联立求解, 可得

$$u=-\frac{\partial p}{\partial x}\int_z^b\frac{(z-z_0)}{G}dz+\frac{\partial p}{\partial x}\int_z^b\frac{(z-z_0)}{G}N_{xx}dz+\frac{\partial p}{\partial y}\int_z^b\frac{(z-z_0)}{G}N_{xy}dz \tag{15}$$

$$v=-\frac{\partial p}{\partial y}\int_z^b\frac{(z-z_0)}{G}dz+\frac{\partial p}{\partial x}\int_z^b\frac{(z-z_0)}{G}N_{xy}dz+\frac{\partial p}{\partial y}\int_z^b\frac{(z-z_0)}{G}N_{yy}dz \tag{16}$$

从方程( 15) 和( 16) 可以看出, 纤维取向影响了熔体的流动类型, 使其与一般聚合物熔体的 Hele-Shaw 型流动不同, 这两式的最后两项即表示由于纤维取向耦合效应引起的压力梯度对速度的影响。$z_0$ 的确定可以利用( 9) 和( 15) , 为

$$z_0=\left(\int_b^b\frac{\left(-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial p}{\partial x}N_{xx}+\frac{\partial p}{\partial y}N_{xy}\right)z}{G}dz\right)\Big/\left(\int_b^b\frac{-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial p}{\partial x}N_{xx}+\frac{\partial p}{\partial y}N_{xy}}{G}dz\right) \tag{17}$$

以 $q_x$, $q_y$ 分别表示 x, y 方向的单位长度的体积流率, 则

$$q_x=-\frac{\partial p}{\partial x}S+\frac{\partial p}{\partial x}S_{xx}+\frac{\partial p}{\partial y}S_{xy}\quad;\quad q_y=-\frac{\partial p}{\partial y}S+\frac{\partial p}{\partial x}S_{xy}+\frac{\partial p}{\partial y}S_{yy} \tag{18, 19}$$

式中

$$S=\int_b^b\int_z^b\frac{z-z_0}{G}dz\quad,\quad S_{ij}=\int_b^b\int_z^b\frac{z-z_0}{G}N_{ij}dz\quad(i,j=x,y) \tag{20}$$

将方程( 4) 沿厚度方向积分, 可得

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_b^b\ln Q\,dz+\frac{\partial}{\partial x}(q_x)+\frac{\partial}{\partial y}(q_y)=0 \tag{21}$$

将(18)和(19)代入(21),设Q为压力和温度的函数,对方程(21)的第一项进行分解,可得

$$G\frac{\partial p}{\partial t}-\frac{\partial}{\partial x}\left[(S-S_{xx})\frac{\partial p}{\partial x}-S_{xy}\frac{\partial p}{\partial y}\right]-\frac{\partial}{\partial y}\left[(S-S_{yy})\frac{\partial p}{\partial y}-S_{xy}\frac{\partial p}{\partial x}\right]=-F \tag{22}$$

式中

$$G=\int_{b}^{z^-}\left(\frac{\partial \ln Q}{\partial p}\right)_T dz+\int_{z^-}^{z^+}\left(\frac{\partial \ln Q}{\partial p}\right)_T dz+\int_{z^+}^{b}\left(\frac{\partial \ln Q}{\partial p}\right)_T dz \tag{23}$$

$$F=\int_{b}^{z^-}\left(\frac{\partial \ln Q}{\partial T}\right)_p\frac{\partial T}{\partial t}dz+\int_{z^-}^{z^+}\left(\frac{\partial \ln Q}{\partial T}\right)_p\frac{\partial T}{\partial t}dz+\int_{z^+}^{b}\left(\frac{\partial \ln Q}{\partial T}\right)_p\frac{\partial T}{\partial t}dz \tag{24}$$

式中,下标l,s分别表示液相和固相,$z^-$和$z^+$为液相和固相界面的厚度方向坐标值。

至此,控制注射成型中纤维增强塑料熔体流动的基本方程归结为压力方程(22)和能量方程(7),分别用以求解压力场和温度场。

## 2.2 纤维取向预测模型

将纤维增强塑料熔体近似为悬浮液,假设纤维为圆柱形刚体,长度和直径均匀,则可用单位矢量p描述单根纤维的取向,矢量p的方向与纤维轴线重合,如图1所示。而空间一点的纤维取向状态可用概率分布函数$\psi(p)$描述,$\psi(p)$定义为一根纤维取向于矢量p方向的概率。

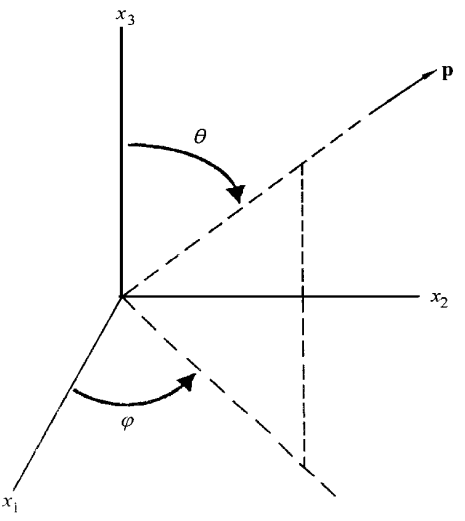


图1 单位矢量p的定义

Fig. 1 The definition of unit vector p

当纤维取向改变时,$\psi$随时间的变化应满足连续性条件,即

$$\frac{D\psi}{Dt}=-\frac{\partial}{\partial p}\cdot(\psi\dot{p}) \tag{25}$$

由方程(25)可知,熔体流动对纤维取向的影响包含在$\dot{p}$中,选择适当的关于$\dot{p}$的表达式,可以求出$\psi$随时间的变化。对于非稀悬浮液,考虑到纤维之间的相互作用,采用Folgar-Tucker取向模型描述纤维的取向行为,即

$$\dot{p}_i=-\frac{1}{2}(\Omega_{ij}p_j)+\frac{1}{2}(\dot{\gamma}C_I p_j-\dot{\gamma}C_I p_k p_l p_i)-\frac{C_I\dot{E}}{7}\frac{\partial\psi}{\partial p} \tag{26}$$

式中,$\Omega_{ij}$为涡张量,$\dot{\gamma}$为变形速率张量,$\dot{E}$为应变速率张量的幅值,$C_I$为表征纤维之间相互作用而产生的随机取向效应的系数。纤维种类、纤维长度和纤维浓度等都对$C_I$产生影响,由于目前尚缺少描述纤维之间相互作用的理论模型,因而通常根据实验数据确定$C_I$。

对于三维取向状态,若采用概率分布函数描述空间任意点的纤维取向状态,则计算量十分浩大,甚至难以实现。为了提高计算效率,可选择紧凑的二阶取向张量$a_{ij}$描述纤维的取向状态。$a_{ij}$定义为

$$a_{ij}=\oint p_i p_j\psi(p)dp \tag{27}$$

由方程(25),(26)和(27)可以推出取向张量变化方程为

$$\frac{Da_{ij}}{Dt}=-\frac{1}{2}(\Omega_{ik}a_{kj}-a_{ik}\Omega_{kj})+\frac{1}{2}(\dot{\gamma}a_{ik}a_{kj}+a_{ik}\dot{\gamma}a_{kj}-2\dot{\gamma}a_{ijkl})+2C_I\dot{E}(D_{ij}-3a_{ij}) \tag{28}$$

式中,$a_{ijkl}$为四阶取向张量,其定义为

$$a_{ijkl}=\oint p_i p_j p_k p_l\psi(p)dp \tag{29}$$

将方程(28)的右边表达式记为 $f_{ij}(\frac{\partial u_k}{\partial x_l}, a_{kl})$, 并且展开左边的物质导数, 则

$$\frac{\partial a_{ij}}{\partial t} + u_1 \frac{\partial a_{ij}}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial a_{ij}}{\partial x_2} + u_3 \frac{\partial a_{ij}}{\partial x_3} = f_{ij}(\frac{\partial u_k}{\partial x_l}, a_{kl}) \tag{30}$$

为了获得一组封闭的方程, 需要给出比较准确的 $a_{ijkl}$ 的逼近表达式. 在三维取向的情况下, 对于较大的 $C_I$ 值, 可选择 H&L2 逼近格式, 而对于较小的 $C_I$ 值, 则可选择 H&L1 或 A&T 逼近格式[5]。

## 2.3　纤维断裂预测模型

为了预测纤维断裂, 应将纤维看作可变形体, 当其承受来自流体的作用力时将发生变形。Yamamoto 和 Matsuoka[6] 的纤维模型适合这一要求。此模型将长度为 2a, 直径为 2a 的圆柱形纤维看作由 m 个圆球组成, 每一对相邻圆球相互连接, 并且纤维的拉伸、弯曲和扭转变形可以看作相邻两球之间的距离、相对角度的变化结果。若以两球之间的拉伸距离 r、弯曲角 $\theta_b$ 和扭转角 $\theta_t$ 表示纤维变形, 如图 2 所示, 则

$$F_s = -K_s r, \quad T_b = -K_b \theta_b, \quad T_t = -K_t \theta \tag{31}$$

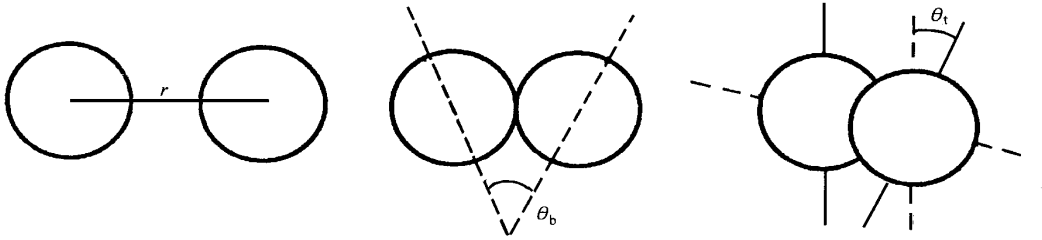


图 2　拉伸距离 r、弯曲角 $\theta_b$ 和扭转角 $\theta_t$

Fig. 2　The stretching distance r, the bending angle $\theta_b$ and the twisting angle $\theta_t$

式中 $F_s$ 为拉伸力, $K_s$ 为拉伸力常量, $T_b$ 为弯矩, $K_b$ 为弯矩常量, $T_t$ 为扭矩, $K_t$ 为扭转常量, 且

$$K_s = \pi a E/2, \quad K_b = \pi a^3 E/8, \quad K_t = \pi a^3 G/4 \tag{32}$$

式中, E 为弹性模量, G 为剪切模量。拉伸力、弯矩和扭矩分别引起拉伸应力、弯曲应力和剪应力, 为

$$R_s = E\varepsilon/2a, \quad R_b = E\theta_b/2, \quad R_t = G\theta_t/2 \tag{33}$$

当两球变形达到一定值, 由此产生的拉伸应力、弯曲应力或剪应力达到极限值时, 纤维即发生断裂, 变形极限值为

$$\varepsilon_{max} = 2aR_s^{max}/E, \quad \theta_b^{max} = 2R_b^{max}/E,$$
$$\theta_t^{max} = 2R_t^{max}/G \tag{34}$$

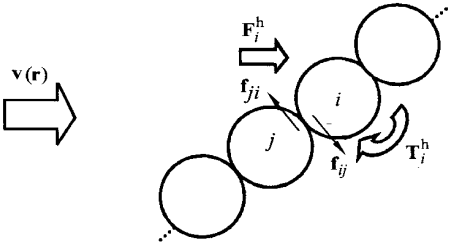


图 3　作用在球 i 上的水动力 $F_i^h$、力矩 $T_i^h$ 和切向摩擦力 $f_{ij}$

Fig. 3　The hydrodynamic force $F_i^h$, torque $T_i^h$ and tangential friction force $f_{ij}$ exerting on the sphere i

在构成纤维的每一个圆球的作用力和力矩中, 除了由于纤维变形引起的拉伸力、弯矩和扭矩之外, 还包括来自流体的水动力 $F_i^h$、力矩 $T_i^h$ 和切向摩擦力 $f_{ij}$, 如图 3 所示。设球 i 位于 $r_i$, 角度为 $\theta_i$, 速度和角速度分别为 $v_i$, $\Omega_i$, 则

$$F_i^h = -6\pi\eta a(v_i - v(r_i)) \tag{35}$$

$$T_i^h = -8\pi\eta a^3(\Omega_i - \Omega(r_i)) \tag{36}$$

于是球 i 的平移、旋转运动方程为

$$m\frac{dv_i}{dt} = \sum F_i^s + \sum f_{ij} + F_i^h \tag{37}$$

$$\frac{2}{5}ma^2\frac{dX_i}{dt} = \sum T_i^b + \sum T_i^t + \sum f_{ij} \times an_{ij} + T_i^h \tag{38}$$

式中 m 为球的质量,

$$n_{ij} = (r_j - r_i)/\hat{u}r_j - r_i\hat{u} \tag{39}$$

$f_{ij}$ 的确定利用无滑动条件, 即在切点处球的平移速度相同, 则

$$v_i + aX_i \times n_{ij} = v_j + aX_j \times n_{ji} \tag{40}$$

将方程(40)对时间 t 进行微分, 可得

$$\frac{dv_i}{dt} + a\frac{dX_i}{dt} \times n_{ij} + aX_i \times (X_i \times n_{ij}) = \frac{dv_j}{dt} + a\frac{dX_j}{dt} \times n_{ji} + aX_j \times (X_j \times n_{ji}) \tag{41}$$

将(37)和(38)代入(41), 可得求解 $f_{ij}$ 的联立方程。

由方程(37)和(38)可得 t+ $t 时刻的 $v_i$, $X_i$, $r_i$ 和 H, 分别为

$$v_i(t + \$t) = v_i(t) + \$t^* (\sum F_i^s + \sum f_{ij} + F_i^h)/m \tag{42}$$

$$X_i(t + \$t) = X_i(t) + 5^* \$t^* (\sum T_i^b + \sum T_i^t + \sum f_{ij} \times an_{ij} + T_i^h)/2ma^2 \tag{43}$$

$$r_i(t + \$t) = r_i(t) + \$tv_i(t) + \frac{1}{2}(\$t)^2\frac{dv_i}{dt} \tag{44}$$

$$H(t + \$t) = H(t) + \$tX_i(t) + \frac{1}{2}(\$t)^2\frac{dX_i}{dt} \tag{45}$$

在已知 t 时刻的纤维长度、位置、变形、流场以及作用于纤维的各种力、力矩的情况下, 对构成纤维的每个球编号, 对于每一对球首先利用方程(31)求得拉伸力、弯矩和扭矩, 水动力和力矩由方程(35)和(36)求得, 然后利用方程(41)求解 $f_{ij}$, 最后利用方程(42)～(45)求解 t+ $t 时刻的速度、角速度、位置和角度, 与方程(34)相比即可判断纤维是否发生断裂, 若发生断裂, 根据球的编号, 可计算断裂后的纤维长度。

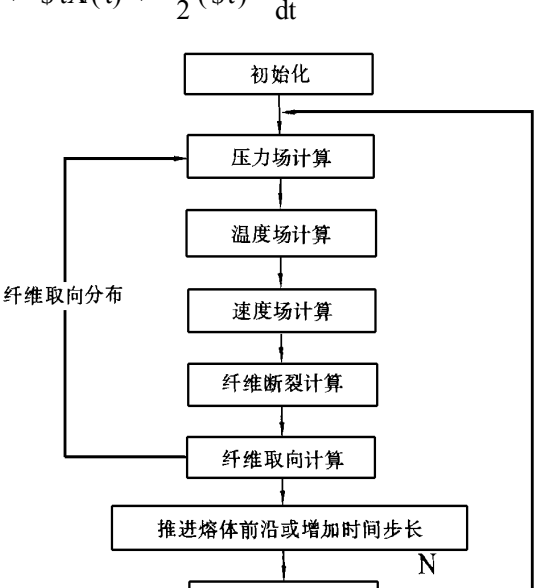


图 4 注塑流动、纤维断裂和纤维取向集成仿真流程

Fig. 4 The flowchart of the integrated simulation of melt flow, fiber fracture and fiber orientation

## 3 集成仿真流程

综合考虑注射成型特点, 以及熔体流动、纤维断裂和纤维取向之间的关系, 给出集成仿真流程, 如图 4 所示。

## 4 结 论

集成仿真纤维增强塑料注射成型中的熔体流动、纤维断裂和纤维取向, 具有重要的工程应用意义。本文在分析其特点的基础上, 提出熔体流动、纤维断裂和纤维取向集成仿真模型, 可对充填和后充填阶段的可压缩流体的非对称流动, 以及由于熔体流动引起的纤维断

裂、三维纤维取向行为进行统一建模, 并且熔体流动和纤维取向相互耦合。

## 参 考 文 献


1 Matsuoka T, Takabatake J, Inoue Y, et al. Polymer Engineering and Science, 1990, 30: 957

2 Henry De Frahan H, Verleye V, Dupret F, et al. Polymer Engineering and Science, 1992, 32: 254

3 Richard T, Lewis E. Polymer Engineering and Science, 1995, 35: 743

4 Chiang H H, Hieber C A, Wang K K. Polymer Engineering and Science, 1991, 31: 125

5 Advani S G, Tucker C L. J of Rheology, 1990, 34: 367

6 Yamamoto S, Maysuoka T. Polymer Engineering and Science, 1995, 35: 1022


## INTEGRATED SIMULATION OF MELT FLOW, FIBER FRACTURE AND FIBER ORIENTATION FOR FIBER REINFORCED PLASTICS IN INJECTION MOLDING


Lin Lanfen　　Dong Jinxiang

(Artificial Intelligence Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027)



Abstract　The analyses of melt flow and the prediction of fiber fracture and orientation are tightly related. Therefore an integrated simulation of all the above aspects is necessary. In this paper, based on the analyses of the features of melt flow, fiber fracture and fiber orientation in injection molding, an integrated simulation model is presented. The proposed model can simultaneously simulate the asymmetric melt flow with compressible fluid during the filling and postfilling stages and complex fiber fracture and orientation behaviors induced by melt flow, and couple the melt flow and fiber orientation.



Key words　injection molding, melt flow, fiber fracture, fiber orientation, simulation


(上接第 92 页)

### 1.1.3　粉包覆丝束预浸技术

飞机结构用复合材料中所使用的热塑性树脂, 溶点高, 难溶于溶剂, 制作预浸料困难, 材料

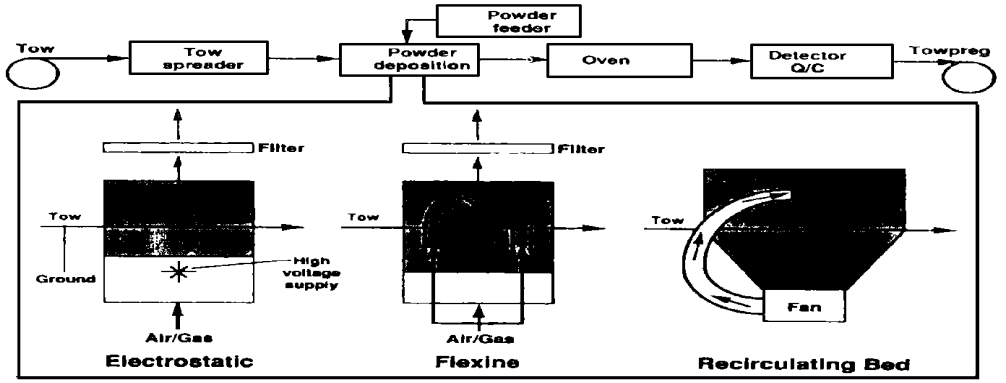


图 5　粉包覆丝束预浸料的制造工艺[11]

成本提高。为克服这一难点, 以 NASA 为中心正在研究粉包覆法丝束预浸料(在纤维丝束上沾满树脂粉末的材料)的制造方法[10~12](图 5)。该技术不仅限于热塑性树脂, 也可考虑适用于热固性的高耐热树脂[11]。

(下转第 128 页)