

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021085

木塑复合材料挤出成型流场的有限元分析

吕兴聪¹, 郝笑龙^{1,2}, 李 昀¹, 欧荣贤^{1,2}, 易 欣^{1,2}, 王清文^{1,2}, 孙理超^{1,2,3}

(1. 生物基材料与能源教育部重点实验室(华南农业大学), 广东广州 510642; 2. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室, 广东广州 510642; 3. 植物纤维功能材料国家林业和草原局重点实验室, 福建福州 350002)



摘要: 在不同螺杆转速和模具温度条件下制备木塑复合材料, 采用旋转流变仪得到不同加工工艺流变参数。利用Polyflow有限元分析软件模拟分析挤出工艺对挤出成型流场的影响。结果表明, 随着螺杆转速的增加, 压力场波动变化并明显提高, 挤出口模的速度场和剪切速率场均明显提高, 黏度场逐渐降低, 螺杆转速为20 r/min时压力相对平稳; 模具温度对速度场和剪切速率场影响较小, 但模具温度越高压力场越小。挤出成型流场的有限元分析结果与试验结果基本吻合。

关键词: 木塑复合材料; 成型工艺; 模具流场; 螺杆转速; 模具温度

中图分类号: TS653; S784 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2022) 02-0071-10

Finite Element Analysis on Extrusion Flow Field of Wood Plastic Composites

LYU Xing-cong¹, HAO Xiao-long^{1,2}, LI Yun¹, OU Rong-xian^{1,2},
YI Xin^{1,2}, WANG Qing-wen^{1,2}, SUN Li-chao^{1,2,3}

(1. Key Laboratory for Biobased Materials and Energy of Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China; 2. Guangdong Laboratory of Lingnan Modern Agriculture, Guangzhou 510642, Guangdong, China; 3. National Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Plant Fiber Functional Materials, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: Wood plastic composites were manufactured at different screw speeds and mold temperatures. The rheological parameters of different processing steps were obtained by the rotating rheometer. The influence of extrusion process on the flow field was simulated and analyzed by Polyflow finite element analysis software. The results showed that with the increase of the screw speed, the pressure field fluctuated and increased significantly, and velocity and shear rate field of the die increased significantly. The viscosity field decreased gradually. The pressure is relatively stable when the screw speed is 20 r/min. The pressure field decreased when the mold temperature increased. However, the mold temperature had a little effect on the velocity and the shear rate field. The finite element analysis findings were basically consistent with the experimental results.

Key words: wood-plastic composite; molding process; die flow field; screw speed; die temperature

收稿日期: 2021-06-30; 修改日期: 2022-02-21

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金“木塑复合材料共挤出柔性界面构筑及结合机理”(2021A1515011014); 国家重点研发计划课题“功能型生物基建材及生态功能型部品制造工艺与装备技术”(2019YFD1101203); 植物纤维功能材料国家林业和草原局重点实验室开放研究基金资助项目“表层阻燃芯层增强共挤出木塑界面调控机理研究”(2019KFJJ09); 广州市教育局林业工程重点学科。

作者简介: 吕兴聪(1995—), 男, 硕士研究生。Email: 907405762@qq.com

通讯作者: 孙理超, 男, 副教授。Email: sunlichao@scau.edu.cn

木塑复合材料 (wood-plastic composite, WPC) 是以热塑性聚合物为基体, 木质纤维为增强体并添加各类加工助剂, 经熔融、混炼以挤出、注塑或热压等成型方式制备的新型复合材料^[1-4]。挤出成型则是一种能够连续化生产 WPC 的主要加工方式, 具备效率高、成本较低且产品性能稳定等优点^[5-7]。但在 WPC 实际挤出成型过程中存在诸多加工困难, 如熔体流动不稳定、表面容易形成缺陷等^[8-10]。

随着计算机技术和数值分析方法的发展, 模拟仿真可以逐渐取代部分实验过程^[11]。挤出口模是高分子材料成型设备中不可或缺的部分, 也是高分子材料在加工成型过程中容易形成表面缺陷的部位, 因此前人开展了很多挤出口模段的模拟仿真。TANG^[12]研究了纯聚丙烯在 200 °C 下通过狭缝模具的等温流动以及随后的挤出胀大过程, 发现速度的重新排列是造成挤出胀大的重要原因之一。ZHANG^[13]模拟了木塑/超临界 CO₂ 复合材料在单螺杆挤出模头的压力场和速度场, 以此来估计压力降速率和成核点的位置。范涛^[14]在研究螺槽深度对 PVC 木塑单螺杆挤出机熔融段熔融过程时发现, 螺槽越深, 熔体输送波动越大, 而且螺槽深度越浅热量传输效果越好。Yilmaz^[15]使用 Polyflow 模拟了高密度聚乙烯在 L 型模具内的挤出过程, 通过优化型材挤压模具的几何参数, 模拟评估了型材模具出口处的不平衡流动。

以往挤出口模的模拟仿真研究多是以热塑性高分子材料本身和挤出口模的几何参数为研究对象^[16-18], 而木塑复合材料 WPC 挤出成型过程大都以热塑性聚合物的挤出工艺为参照, 因此对 WPC 在不同工艺条件下挤出口模段的模拟仿真迫在眉睫, 尤其是不同螺杆转速和模具温度的挤出流场有限元分析。

本研究采用 Polyflow 有限元分析软件对 WPC 不同螺杆转速和模具温度条件下挤出口模定型段流场的三维信息进行模拟仿真, 得到压力场、速度场、剪切速率和黏度场的分布情况, 进而研究分析其变化规律, 为 WPC 挤出模具的流道设计和生产工艺参数的调整提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

毛白杨 (*Populus tomentosa* Carr.) 木纤维, 外购, 树龄 8 年, 经粉碎加工取粒度 270~380 μm 备用。

高密度聚乙烯 (high density polyethylene, HDPE), 牌号 5000S, 密度 0.95 g/cm³, 熔融指数 0.9 g/10 min (190 °C, 2.16 kg); 马来酸酐接枝聚乙烯 (maleic anhydride grafted polyethylene, MAPE), 接枝率约 1%, 熔融指数 1.7 g/10 min (190 °C, 2.16 kg); 润滑剂, 牌号 530D, 主要成分为硬脂酸钠。均外购。

1.2 主要设备

高速混合机 HRS-10、锥形双螺杆挤出机 CTW100、旋转流变仪 Discovery HR-2 等。

1.3 试验设计

螺杆转速和模具温度对 WPC 挤出成型有重要影响, 因此制备不同的螺杆转速和模具温度条件下的 WPC 并进行流变性能测试, 获得模拟所需要的流变特性参数。通过建立计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 几何模型, 调整转速和模具温度来模拟不同加工工艺下 WPC 挤出成型的流场; 分析不同工艺条件下得到的压力场、速度场、剪切速率场和黏度场, 与实际工艺参数进行对比, 考察模型的适用性。

挤出工艺: 取适量杨木纤维于 105 °C 烘箱中干燥 24 h, 烘至含水率为 3%±0.5%。将杨木纤维、HDPE、MAPE 和润滑剂按 50%、45%、3%、2% 的质量配比称量后投入高速混合机中, 在转速 100 r/min、温度 80 °C 的条件下搅拌 10 分钟。双螺杆挤出机口模加工温度分别设置为 175、180 和 185 °C; 挤出机固体输送段为 155 °C, 熔融段为 160 °C, 熔体输送段为 175 °C, 法兰处 (熔体输送段与口模相连的部位) 温度为 180 °C; 锥形双螺杆挤出机的螺杆转速分别选取 20、30 和 40 r/min。挤出成型 WPC 试样尺寸为 25 mm×4 mm (宽度×厚度)。工艺编号列于表 1。由于聚乙烯的加工温度为 160~175 °C, 口模的温度比熔融段高 5~10 °C, 故本研究选择 175~185 °C。挤出机实际转速范围一般为 20~40 r/min。

表1 不同挤出工艺

Tab.1 Different processing technology

工艺编号	模具温度/°C	螺杆转速/(r·min ⁻¹)
175-20R	175	20
175-30R	175	30
175-40R	175	40
180-20R	180	20
185-20R	185	20

1.4 流变测试

采用旋转流变仪对试样进行频率和速率扫描测试, 得到试样在不同剪切速率下的黏度参数。选用 25 mm 平板夹具, 试件经台锯锯切和砂纸打磨制成直径 25 mm、厚度 2 mm 的木塑圆片用于流变测试。在试验前, 将样品放在防滑夹具上静置 5 分钟, 使样品充分熔融。将上下夹具的间隙逐渐降低到 3.8 mm, 然后刮掉多余的物料, 使样品与夹具间隙一致。根据应力扫描得到 WPC 的线性黏弹区。在 160、170 和 180 °C 三个温度下进行测试, 应变为 0.02%, 频率扫描范围为 0.01~100 rad/s, 剪切速率扫描范围为 0.01~1 s⁻¹。每项测试重复 4 次。

1.5 流变参数

熔体黏度是 WPC 加工流变学的一个重要指标, 较理想的模型一般以单一变量方程为主^[19-20]。在挤出成型工艺常用的剪切速率范围内, 幂律模型 (Power Law) 因具有良好的精度而广泛应用。WPC 加工过程的剪切速率在 10¹~10³ s⁻¹ 范围内, 而且 WPC 流变曲线与幂律模型的拟合程度较高, 所以选用幂律模型进行模拟^[21]。

$$\eta = K(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (1)$$

式中: η —黏度; K —黏度系数, 通常为熔体的零剪切黏度; λ —松弛时间, s; $\dot{\gamma}$ —剪切速率, 1/s; n —非牛顿流体流动行为指数, 又称幂律指数。 n 、 K 在一定的温度和压强下为常数。

考虑表 1 中三个温度水平对黏度曲线的影响, 温度表达式 $H(t)$ 由近似阿伦尼乌斯模型 (Arrhenius Approximate Law) 给出, 模型见式 2^[22]。

$$H(t) = \exp[-\alpha(t_0 - t_a)] \quad (2)$$

式中: α —活化能因子; t_0 —初始温度, K; t_a —参考温度, K。

采用 Polyflow 有限元分析软件中的前处理模块 Polymat 拟合材料的流变参数, 见表 2。

表2 不同加工工艺的流变参数

Tab.2 Rheological parameters of different processing technologies

工艺	$K/\text{Pa}\cdot\text{s}$	n	λ/s	$\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$	$t_a/^\circ\text{C}$
175-40R	165 401	0.355	0.102	0.013	165
175-30R	169 424	0.329	0.096	0.014	170
175-20R	204 510	0.312	0.096	0.014	170
180-20R	167 810	0.370	0.074	0.016	156.5
185-20R	172 744	0.351	0.096	0.013	164.0

1.6 CFD 几何模型建立

由于 WPC 熔体加工过程流动的复杂性, 很难精确描述其流动性能, 对模型做如下假设: 1) 挤出的 WPC 熔体是不可压缩的高黏度非牛顿流体; 2) 熔体已完全填充到挤出口模中, 并且在流道中处于等温、稳定和层流状态; 3) 由于流速慢和黏度高的特性, 惯性力和重力可以被忽略; 4) 在挤出过程中, 木塑熔体与通道壁之间没有滑移。

因此描述挤出口模内的控制方程^[24-25]见式 3、4。

$$\nabla V = 0 \quad (3)$$

$$\nabla p - \nabla \tau = 0 \quad (4)$$

式中: V —速度向量; p —压力, MPa; τ —应力张量。

1) 几何模型建立: 使用 SpaceClaim 软件设计模具的三维模型, 如图 1 所示, 其中挤出口模分为两部分: 定型段和自由段。考虑挤出口模的几何形状为轴对称模型, 因此可以取 1/4 模型进行模拟计算。为了深入分析问题, 在壁面上取两条对称线 a 和 b 。在 X 、 Y 、 Z 坐标轴中, X 轴代表由熔体中心到水平壁面的方向, Y 轴代表挤出方向, Z 轴代表由熔体中心到纵向壁面的方向; a 为熔体中心延 Y 轴方向的对称线, b 为熔体中心延 Z 轴方向的对称线。

2) 网格划分: 对挤出口模进行网格划分。用扫描模式生成六面体网格, 其中六面体单元有 3 700 个, 节点有 8 888 个。在挤出口模出口与自由表面的附近采用更密集的网格来模拟更复杂的流动性能, 网格划分图如图 1b 所示。

3) 边界条件设定: 模型的边界如图 1c 所示。在入口处施加流量, 将体积流量设置为挤出机的实际挤出流量。在模具壁上, 为使计算收敛, 假定存在防滑条件: $v_n = v_s = 0 \text{ m/s}$ 。

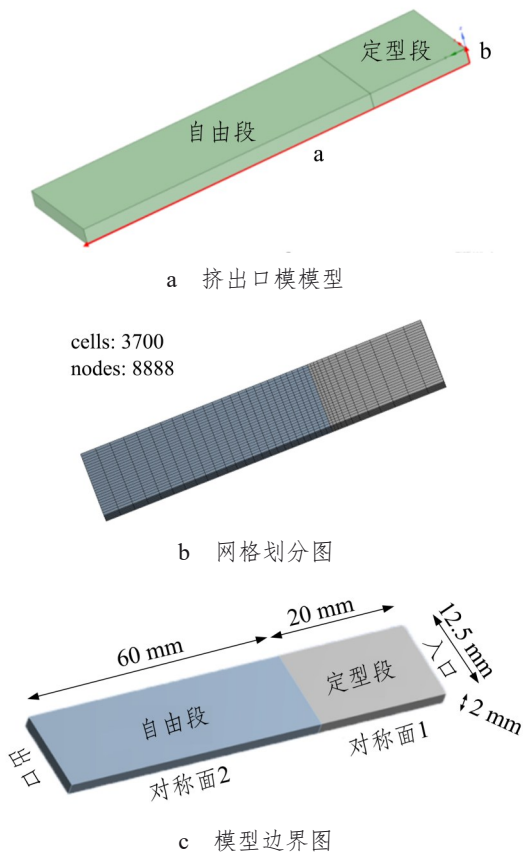


图1 挤出口模三维模型
Fig.1 Extrusion die model

在对称平面上, 通常使用对称条件:

$$v_n = 0, f_s = 0$$

在自由表面上, 当从狭缝头的出口挤出熔体时, 熔体的表面张力被忽略, 其定义为:

$$f_s = f_n = 0, v_n = 0$$

在流道的出口处, 假设没有任何切向速度和法向力施加在熔体的出口边界上, 则力的条件设置为:

$$f_s = f_n = 0$$

其中: v_n 、 v_s —熔体的法向、切向速度, m/s; f_n 、 f_s —熔体的法向、切线应力, N^[26]。

4) 网格重置: 自由表面的数值模拟问题一般情况下需要用到网格重置, 自由表面位置的改变会影响到网格某些部分, 因此网格内部各结点的重新定义具有重要意义。挤出口模是拥有自由表面的3D挤出模型, 并且出口附近的模具壁面是变化的, 所以对这两部分区域进行网格重置, 选择的网格重置技术为 Optimesh.3D^[27]。

2 结果与讨论

2.1 流变参数表征结果

以175-20R工艺WPC试样为例, 其在3个测试温度条件下的流变曲线(图2a、2b)显示, 熔体的黏度和复数黏度曲线受剪切速率的影响比较明显。不同温度下的黏度曲线相似, 都随着剪切速率的增大而降低。随着测试温度的升高, 体系的复数黏度下降。WPC体系的黏度对温度和剪切速率有很强的依赖性, 表现出“剪切变稀”行为, 属于典型的“假塑性”流体^[23]。图2c为175-20R试样在测试温度170℃条件下幂律模型的拟合曲线, 其相关系数 R^2 为0.982, 证明在该工艺条件下, 幂律模型可以较好地模拟WPC的流变行为。

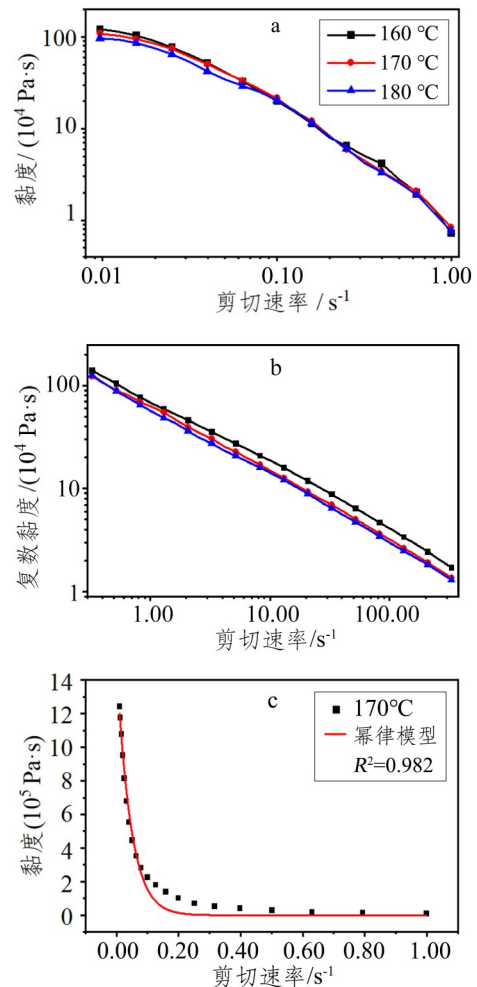


图2 黏度与剪切速率的关系图
Fig.2 Diagram of the relationship between viscosity and shear rate

2.2 螺杆转速对挤出口模内流场的影响分析

2.2.1 压力场

图3a、3b分别为不同螺杆转速下WPC熔体在 $x = z = 0$ 时沿Y轴中心线a方向的压力分布、 $x = y = 0$ 时沿Z轴中心线b方向的压力分布, 图4为螺杆转速20 r/min下压力分布云图。

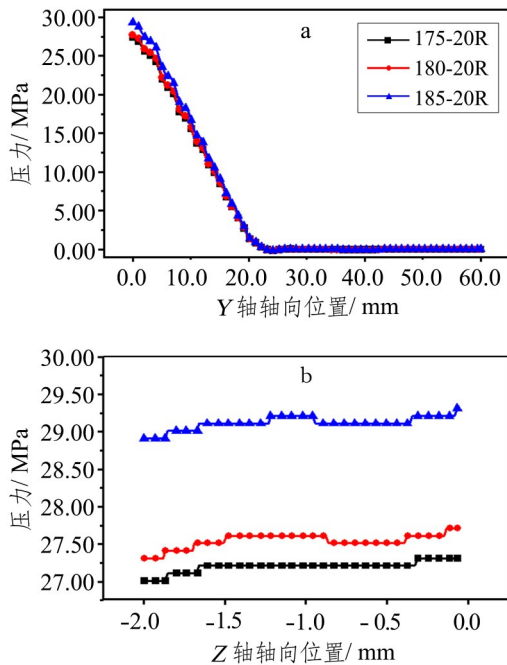


图3 不同螺杆转速下的压力分布图

Fig.3 Pressure distribution chart under different screw speeds

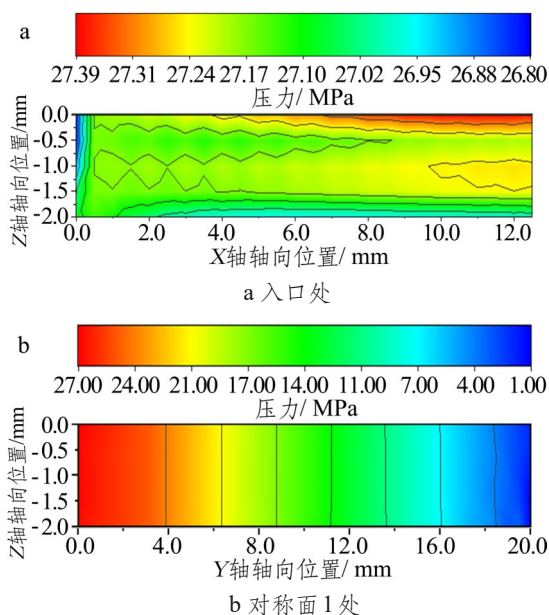


图4 压力分布云图

Fig.4 Pressure distribution cloud chart

从图3a可以看出, 转速分别为20、30和40 r/min时, 挤出口模内沿熔体流动中心线a上的压力分布规律相同。在定型段, 流道内的压力沿着挤出方向Y向出口处逐渐降低, 最小压力在模具的出口处; 进入到自由段, 熔体压力保持稳定。最大压力分别为27.4、27.7和29.3 MPa, 表明出口处的压力随着螺杆转速的增大而增大。这种变化规律与实际挤出工况的规律是一致的。因为随着螺杆转速的增大, 熔体的体积流率也会相应的增大, 由于WPC熔体在流动过程中受到流道壁面的束缚, 并不能快速地流出, 造成熔体在口模处的大量堆积, 表现为压力的增大^[28]。由图3b和图4可知, 当 $x = y = 0$ 时, 沿Z轴中心线b方向的压力分布, 随着螺杆转速的增大压力波动也逐渐增大, 所以螺杆转速为20 r/min时压力相对更稳定。

2.2.2 速度场

如图5a所示, 不同螺杆转速下沿Y轴中心线a方向的速度分布呈现规律性变化。木塑复合材料熔体速度的最大值在挤出口模的入口处, 沿着挤出方向速度值出现小幅度的降低, 但整体基本稳定。但在模具出口附近速度显著降低, 速度场发生重新排列, 这是造成挤出胀大的原因之一^[29]。进入自由段后, 流道内的边界条件不再发生变化, 速度也保持稳定。这说明挤出口模内沿挤出方向Y的速度随着转速的增大而增大。

由图5b可知, WPC熔体沿Z轴中心线b方向的速度随转速的增大而增大。从图6中也可以发现, 沿Z轴方向从挤出口模的壁面到WPC熔体流动的中心, 流道内的速度逐渐增大。

2.2.3 剪切速率场

由图7a可知, 在 $x = z = 0$ 时沿Y轴中心线a方向的剪切率先出现了小幅度波动, 直到模具出口附近出现剪切速率的显著增大, 并且达到最大值。这是因为WPC熔体离开模具出口时会受到较大的剪切力。在定型段, 沿挤出方向Y的剪切速率随着转速的增大而增大。当转速为20 r/min时, 熔体流动中心的剪切速率最大值为 2.85 s^{-1} , 当转速为30 r/min时, 熔体流动中心的剪切速率最大值为 3.90 s^{-1} , 当转速为40 r/min时, 熔体流动中心的剪切速率最大值为 5.45 s^{-1} 。

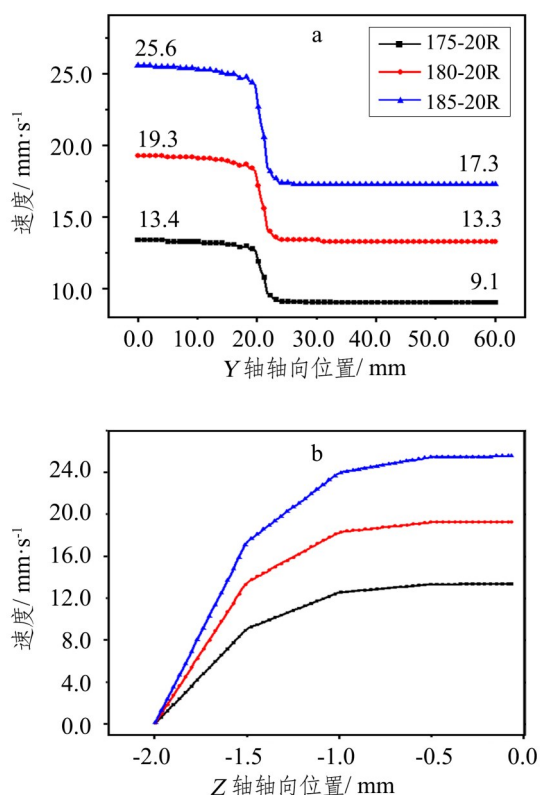


图5 不同螺杆转速下的速度分布图

Fig.5 Velocity distribution chart under different screw speeds

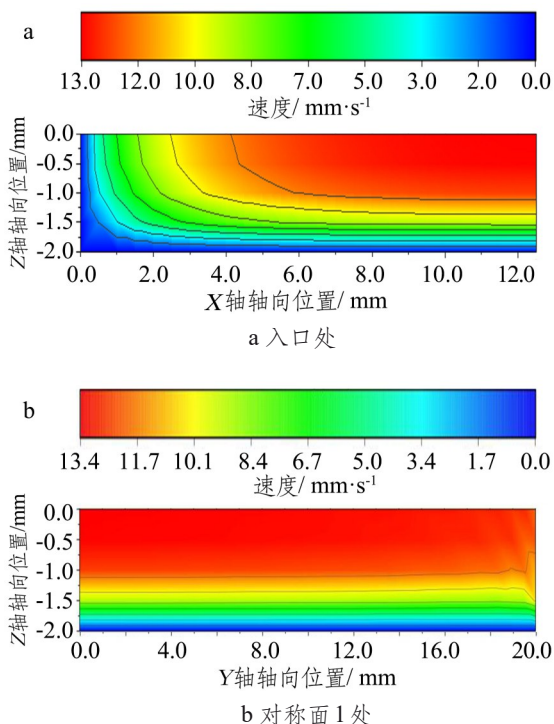


图6 速度分布云图(20 r/min)

Fig.6 Velocity distribution cloud chart

由图 7b 和图 8 可知, 在挤出口模的入口处剪切速率呈现规律性变化, 从挤出口模的壁面到木塑熔体流动中心线 b 的剪切速率逐渐降低, 并且剪切速率随着转速的增大而增大。剪切速率增大有利于熔体塑化, 但过大转速会造成剪切热的增加。

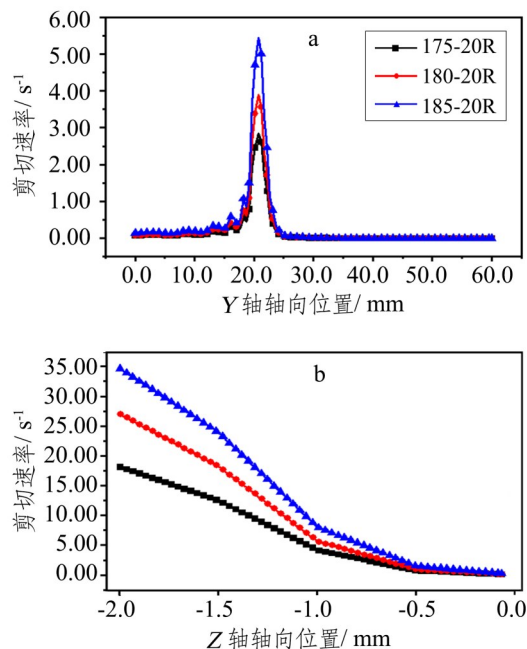


图7 不同螺杆转速下的剪切速率分布图

Fig.7 Shear rate distribution chart under different screw speeds

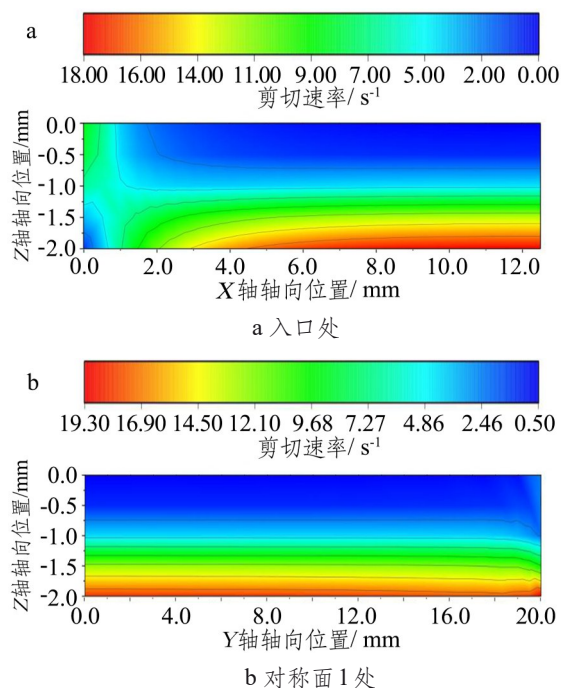
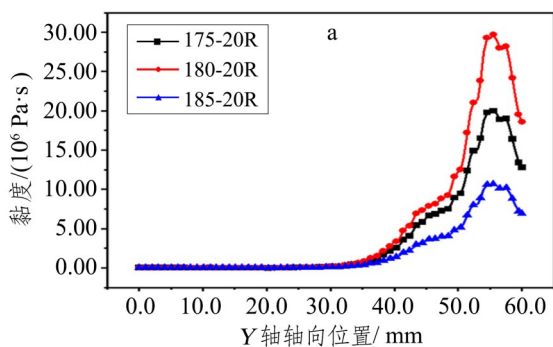


图8 剪切速率分布云图(20 r/min)

Fig.8 Shear rate distribution cloud chart

2.2.4 黏度场

由图9a可知, 在 $x = z = 0$ 时沿 Y 轴中心线 a 方向的黏度分布规律相同, 即WPC熔体的黏度沿挤出方向 Y 呈增大的趋势, 在自由表面的出口附近达到最大值。这表明沿挤出方向 Y 的黏度随着螺杆转速的增大而降低。



由图9b和图10可知, $x = y = 0$ 时, 沿 Z 轴中心线 b 方向的黏度变化与剪切速率相关。WPC熔体黏度从挤出口模壁面到流动中心逐渐增大, 这是由于壁面比流动中心的剪切速率更大, 导致剪切变稀, 与剪切速率场的结果一致。同时沿 Z 轴中心线方向的黏度随着转速的增大而降低。

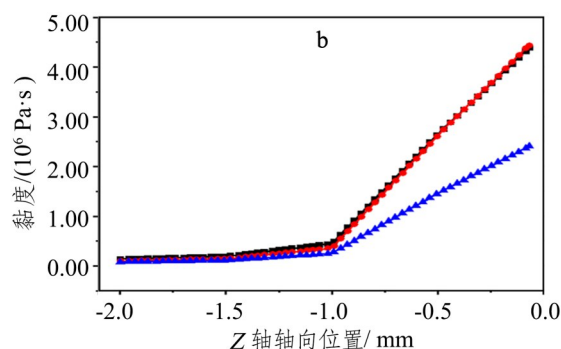


图9 不同螺杆转速下的黏度分布图

Fig.9 Viscosity distribution chart under different screw speeds

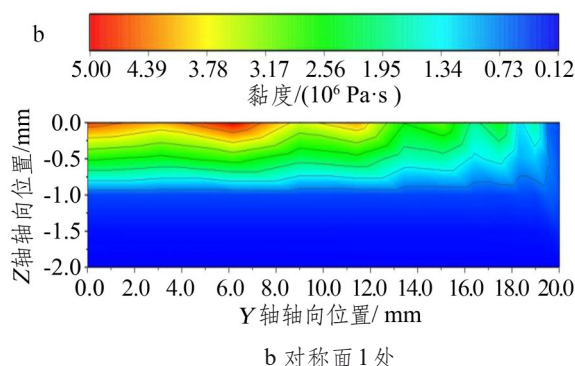
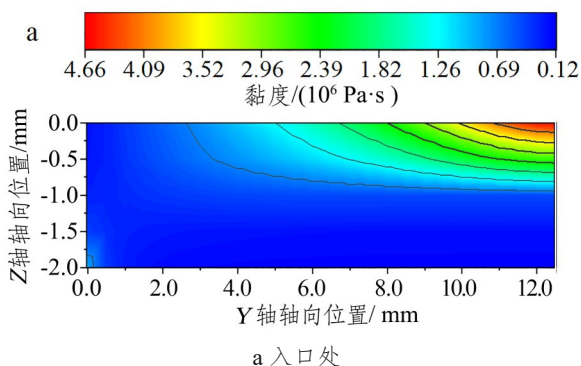


图10 黏度分布云图(20 r/min)

Fig.10 Viscosity distribution cloud chart

2.3 模具温度对挤出口模内流场的影响分析

由于模具温度变量差距对黏度场影响较小, 故本节只分析模具温度对压力场、速度场和剪切速率场的影响。

2.3.1 压力场

图11是模具温度为175℃, 180℃, 185℃时挤出口模内的压力分布曲线。在 $x = z = 0$ 时沿 Y 轴中心线 a 和 $x = y = 0$ 时沿 Z 轴中心线 b 方向上的压力分布规律相同, 即流道内的压力随着模具温度的升高而降低, 最小压力出现在模具出口附近(图12)。模具温度的升高会使WPC熔体的流动性增强, 进而使挤出口模内的压力下降^[30]。

2.3.2 速度场

如图13a、13b所示, 随着模具温度的升高, 在 $x = z = 0$ 时沿 Y 轴中心线 a 、 $x = y = 0$ 时沿 Z 轴中心线 b 方向的速度增量最大也只有0.0001 m/s, 变化并不明显。

模具温度升高意味着木塑熔体温度的升高, 使木塑熔体的流动性随之增强。然而, 由于熔体的高黏度特性, 分子间的内摩擦很大, 再者温度升高只有5℃, 所以木塑熔体流速的变化并不明显。

图14为沿 Z 轴方向从挤出口模的壁面到熔体流动的中心, 流道内的速度逐渐增大。

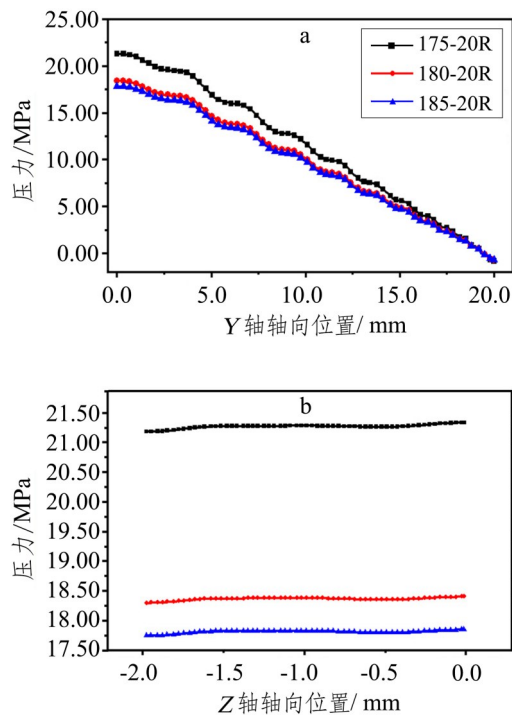


图11 不同模具温度下的压力分布图

Fig.11 Pressure distribution chart at different mold temperatures

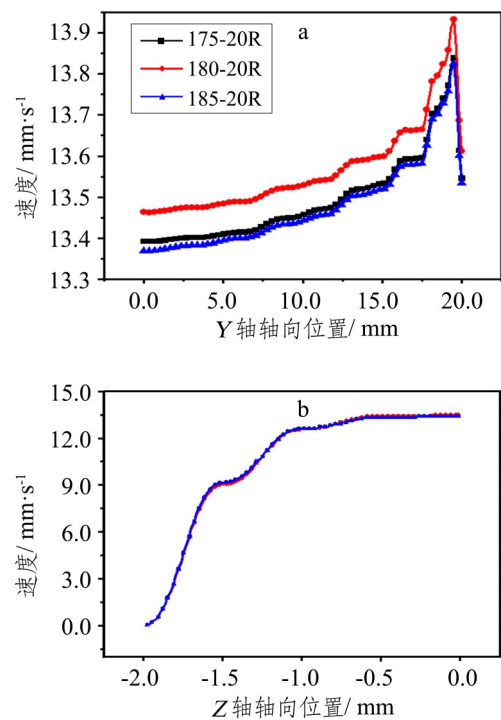


图13 不同模具温度下的速度分布图

Fig.13 Pressure distribution chart at different mold temperatures

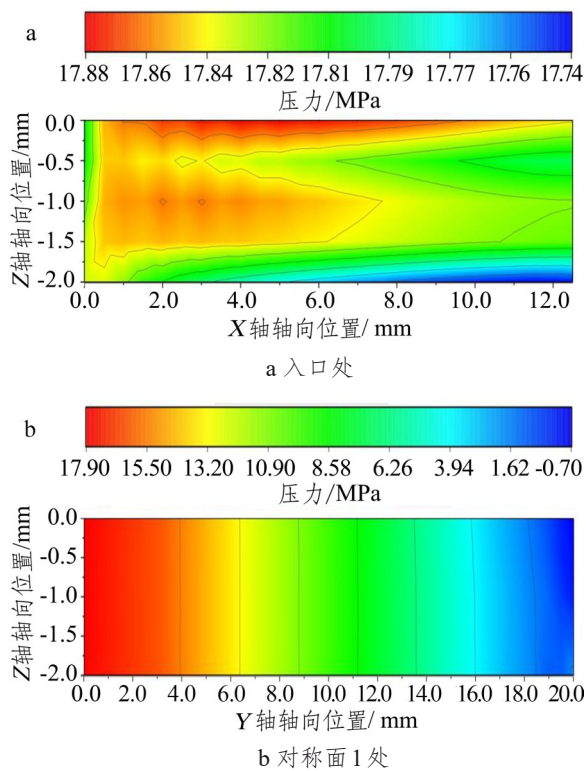


图12 压力分布云图(185 °C)

Fig.12 Pressure distribution cloud chart

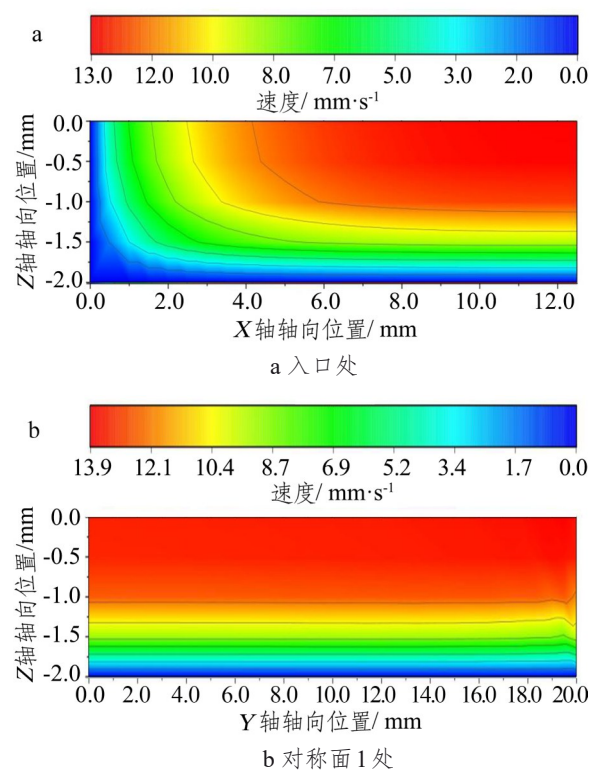


图14 速度分布云图(185 °C)

Fig.14 Velocity distribution cloud chart

2.3.3 剪切速率场

如图15所示，剪切速率主要分布在壁面上，且数值较小，随着模具温度的升高，剪切速率的变化并不明显。由图16可以发现，从挤出口模的壁面到木塑熔体流动的中心剪切速率逐渐降低。

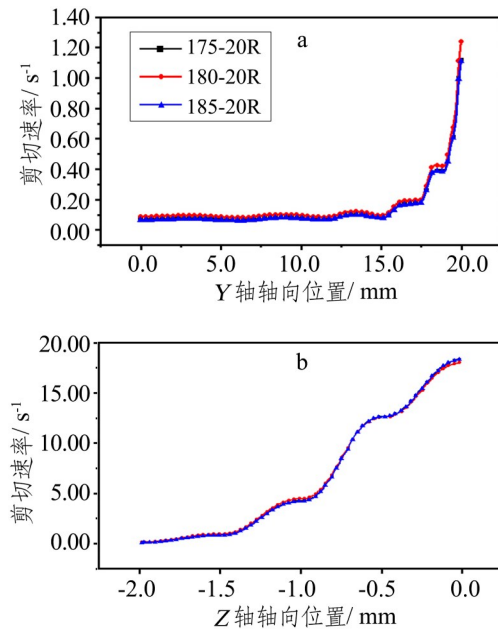


图15 不同模具温度下的剪切速率分布图
Fig.15 Shear rate distribution chart at different mold temperatures

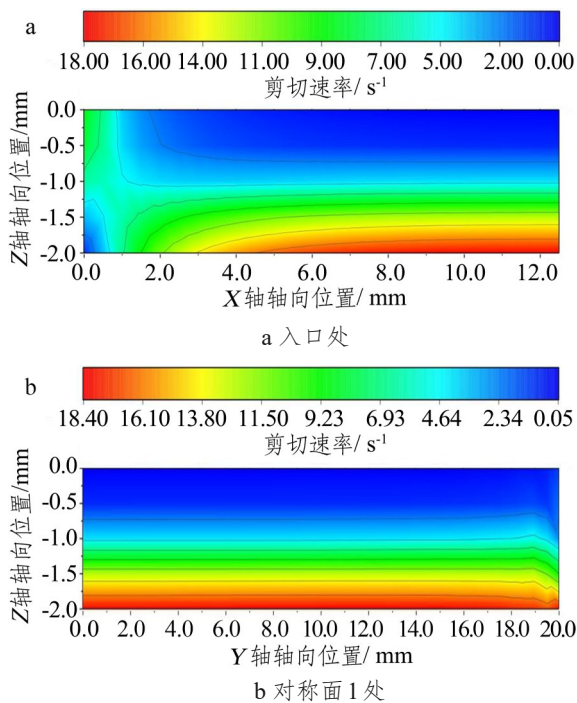


图16 剪切速率分布云图(185 °C)
Fig.16 Shear rate distribution cloud chart

2.4 模型验证

在研究口模温度挤出成型的过程中，分别设置口模加工温度为175 °C、180 °C和185 °C；挤出机固体输送段为155 °C，熔融段为160 °C，熔体输送段为175 °C，法兰处温度为180 °C；锥形双螺杆挤出机的螺杆转速分别选取20 r/min，30 r/min，40 r/min，保持其他参数不变。转速的变化，使入口流量发生了变化，入口流量随着转速的增大而增大。表3为不同挤出工艺的工况。

表3 不同挤出工艺下压力的变化情况

Tab.3 Pressure conditions of different extrusion processes			
螺杆转速/(r·min ⁻¹)	压力/MPa	模具温度/°C	压力/MPa
20	6.83	175	6.83
30	7.07	180	6.60
40	8.09	185	5.59

不同温度对挤出口模内速度和剪切速率场的影响较小，由表3可知，螺杆转速增加时，压力由6.83 MPa升高至8.09 MPa,与2.2.1中由27.4 MPa升高至29.3 MPa规律相符。由表3可知，不同模具温度下WPC由挤出机测试得出的压力值由6.83 MPa降至5.59 MPa，与模拟结果2.3.1中压力由21.3 MPa降至17.8 MPa的规律基本吻合。

3 结论

1) 提高螺杆转速不仅使挤出口模流场的压力场增大，还会造成压力波动，本研究中螺杆转速为20 r/min时压力相对平稳。速度场和剪切速率场随着螺杆转速的增大而增大，入口流量也随之增大。而黏度场随着转速的增加而降低。

2) 模具温度对挤出口模速度和剪切速率场的影响较小。模具温度升高会使压力场降低。

3) 通过压力变化情况验证可知，采用有限元法建立的挤出成型数值模拟结果与实际挤出工况参数的规律基本吻合。

4) 在质量分数为50%的WPC下可以通过模拟结果总结的规律，来指导实际挤出WPC时遇到的工艺问题，如在温度一定的条件下，适当的调节螺杆转速可以提高效率；但是由于影响因素较为复杂，模拟数值与实际工艺参数数据仍有一定的差异，而且模具目前比较单一，所以在模具设计方面的还需要完善。

参考文献:

- [1] Elamin M A M, Li S X, Osman Z A, et al. Preparation and characterization of wood-plastic composite by utilizing a hybrid compatibilizer system[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 154: 112659.
- [2] Feng Y H, Yuan Z X, Sun H, et al. Toughening and reinforcing wood flour/polypropylene composites with high molecular weight polyethylene under elongation flow[J]. Composites Science and Technology, 2020, 200(108395).
- [3] 梅生启,唐广,杨斌,等. 基于分数阶黏弹性模型的本塑复合材料蠕变/回复性能分析[J]. 复合材料学报, 2020, 37(8): 2055-2064.
- MEI S Q, TANG G, YANG B, et al. Creep/recovery behavior analysis of wood-plastic composites based on fractional order viscoelastic model[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(8): 2055-2064.
- [4] Yatigala N S, Bajwa D S, Bajwa S G. Compatibilization improves physico-mechanical properties of biodegradable biobased polymer composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 107: 315-325.
- [5] Adhikary K B, Park C B, Islam M R, et al. Effects of lubricant content on extrusion processing and mechanical properties of wood flour-high-density polyethylene composites[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2011, 24(2): 155-171.
- [6] Godard F, Vincent M, Agassant J F, et al. Rheological behavior and mechanical properties of sawdust/polyethylene composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 112(4): 2559-2566.
- [7] LI H J, Law S, Sain M. Process rheology and mechanical property correlation of wood flour-polypropylene composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2004, 23(11): 1153-1158.
- [8] 徐爱玲,宋永明. 纳米蒙脱土对木粉/聚丙烯复合材料发泡性能的影响[J]. 复合材料学报, 2021, 38(8): 2497-2504.
- XU A L, SONG Y M. Effect of nano-montmorillonite on foaming properties of wood flour/polypropylene composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(8): 2497-2504.
- [9] Li T Q, Wolcott M P. Rheology of wood plastics melt, part 2: Effects of lubricating systems in HDPE/maple composites[J]. Polymer Engineering and Science, 2006, 46(4): 464-473.
- [10] Laufer N, Hansmann H, Koch M. Rheological Rheological characterisation of the flow behaviour of wood plastic composites in consideration of different volume fractions of wood[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 790: 012017.
- [11] 张敏,孙胜,贾玉玺. 基于有限元方法的聚合物共挤出界面形成过程数值研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(5): 712-718.
- ZHANG M, SUN S, JIA Y X. Numerical analysis of the polymer coextrusion interface based on the finite element method[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2008, 16(5): 712-718.
- [12] TANG D G, Marchesini F H, D'hooge D R, et al. Isothermal flow of neat polypropylene through a slit Die and its Die swell: Bridging experiments and 3D numerical simulations[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2019, 266: 33-45.
- [13] ZHANG J J, Rizvi G M, Park C B, et al. Study on cell nucleation behavior of HDPE - wood composites/supercritical CO₂ solution based on rheological properties[J]. Journal of Materials Science, 46 (11): 3777-3784.
- [14] 范涛,陈作炳,杜佳佳,等. 螺槽深度对PVC木塑单螺杆挤出机熔融段熔融过程的影响[J]. 武汉: 武汉理工大学学报, 2015, 37(1): 125-130.
- FAN T, CHEN Z B, DU J J, et al. Effects of spiral groove depth on PVC wood-plastics single-screw extruder melting section melting process[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(1): 125-130.
- [15] Yilmaz O, Gunes H, Kirkkopru K. Optimization of a profile extrusion Die for flow balance[J]. Fibers and Polymers, 2014, 15(4): 753-761.
- [16] SUN D P, ZHU X Z, GAO M G. 3D numerical simulation of reactive extrusion processes for preparing PP/TiO₂ nanocomposites in a corotating twin screw extruder[J]. Materials, 2019, 12(4): 671.
- [17] WEN J S, YANG M K, FAN D J. Numerical simulation of energy consumption in the melt conveying section of eccentric rotor extruders [J]. Advances in Polymer Technology, 2018, 37(8): 3335-3347.
- [18] ZHANG C S, YANG S, ZHANG Q Y, et al. Automatic optimization design of a feeder extrusion Die with response surface methodology and mesh deformation technique[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(9/10/11/12): 3181-3193.
- [19] 范涛. PVC木塑单螺杆挤出成型过程与试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- [20] 刘亚秋,李明,孙焱. 木塑挤出成型特性分析与影响因素数值仿真研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(3): 823-827.
- LIU Y Q, LI M, SUN Y. Numerical simulation on characteristic and influencing factors of wood plastic composite melt in extruder[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(3): 823-827.
- [21] LI T Q, Wolcott M P. Rheology of HDPE-wood composites. I. Steady state shear and extensional flow[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2004, 35(3): 303-311.
- [22] 孙秀伟. 聚合物熔体流变特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [23] 王鹏. 高填充木塑复合材料流变行为与结晶性质研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [24] Mompean G, Thais L, Tomé M F, et al. Numerical prediction of three-dimensional time-dependent viscoelastic extrudate swell using differential and algebraic models[J]. Computers & Fluids, 2011, 44(1): 68-78.
- [25] HAN C D. What is the role of "pressure" in the use of capillary and slit flows to determine the shear - rate dependent viscosity of a viscoelastic fluid[J]. Polymer Engineering & Science, 2008, 48(6): 1126-1140.
- [26] 钱欣,许王定,金杨福. POLYFLOW基础及其在塑料加工中的应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [27] 任珊珊. 精密共挤出机及木塑异型材包覆共挤头的设计与研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2019.
- [28] 付丽. 超高分子量聚乙烯熔融挤出初生丝过程的模拟与实验研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [29] Yarusso B J. Exit and entrance flows of non-Newtonian fluids in parallel slits[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1991, 40 (1): 103-117.
- [30] 李敏. 含能材料单螺杆压伸过程仿真模拟研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.

(本文编校 张 鹏、向 琴)

更正启事

本刊2022年第1期第68—74页刊载的《榉木—自攻螺钉复合榫连接节点单剪性能》一文中,经作者核对,“榉木”应改为“水青冈木”,特此更正,并向读者歉意。同时,也真诚地欢迎广大读者继续提出宝贵意见和建议,帮助本刊不断进步。

《木材科学与技术》编辑部