

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.12.010

小微注射成型模内熔体流变行为的原位监测方法及影响因素

赵南阳¹, 金胜祥¹, 吴琼², 许忠斌^{1,3}

(1. 浙江大学能源工程学院, 杭州 310027; 2. 贝隆精密科技股份有限公司设计研发部, 浙江余姚 315400;

3. 浙大城市学院材料成型集成技术与智造装备浙江省工程研究中心, 杭州 310015)

摘要: 现有基于注塑机塑化单元的监测方法难以应用于模内熔体状态精确分析, 尤其模内的流变监测手段受狭缝细微结构局限, 存在实施困难和破坏制品表面质量的问题。提出一种利用注射成型模内细微流道本身结构特点开展熔体黏度原位监测的方法。通过在模内流道中布置测量模块, 并集成可替换镶块结构, 实现聚合物熔体加工流变性能的在线测量。研究了模内测量通道尺寸效应在不同工艺参数和通道结构下的变化规律, 考察了塑化温度、注射压力和模具温度对熔融聚合物流动的影响。结果表明, 随着通道内径的减小, 测量通道的尺寸效应增大; 而随着注射速率的增加和塑化温度的减小, 尺寸效应也随之增大。监测得到的模内熔体黏度主要受塑化温度影响, 受注射压力和模具温度的影响较小。模内熔体黏度原位监测方法有效表征了注射成型复杂细微结构模具内部的熔体状态, 并且避免了模内监测元件布局对制品表面质量的影响。该方法拓展了模内加工流变学监测分析手段, 为注射成型精密微结构制品质量调控提供了借鉴。

关键词: 注射成型; 模内监测; 加工流变学; 聚合物; 黏度

中图分类号: TQ320 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)12-0066-07

In-situ monitoring method and influencing factors of in-mould melt rheological behavior in fine/micro injection molding

ZHAO Nanyang¹, JIN Shengxiang¹, WU Qiong², XU Zhongbin^{1,3}

(1. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. R&D Center, Beilong Precision Technology Company Limited, Yuyao 315400, China; 3. Zhejiang Provincial Engineering Center of Integrated Manufacturing Technology and Intelligent Equipment, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China)

Abstract : Existing monitoring methods based on the plasticizing unit of injection molding machines are difficult to apply accurately to analyze the melt state within the mould. Additionally, in-mould rheological monitoring techniques are limited by narrow gap fine structures, leading to insufficient applicability and potential damage to the surface aesthetics of the product. To address these issues, a method for in-situ monitoring of melt viscosity using the in-mould fine channel structure characteristics in injection molding was proposed. Online measurement of the rheology of polymer melt processing was realized with arrangement measurement modules within the mold flow channel and the integration of replaceable insert structures. The change rules of the size effects of the in-mould measurement channels under different process parameters and channel structures were specifically investigated, as well as the impact of plasticizing temperature, injection pressure, and mould temperature on the flow state of molten polymers. The results indicate that the size effect of the measurement channel increases with the reduction of the diameter of the channel. The size effect rises with the increase of injection velocity and decrease of plasticizing temperature. The polymer melt's viscosity in mould is mainly affected by the plasticizing temperature, while the influences of injection pressure and mould temperature on the

基金项目: 浙江省高层次人才特殊支持计划(No.2023R5218), 余姚市重点研发计划暨“揭榜挂帅”项目(No.2023JH03010002)

通信作者: 许忠斌, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为材料成型加工及装备

收稿日期: 2024-09-28

引用格式: 赵南阳, 金胜祥, 吴琼, 等. 小微注射成型模内熔体流变行为的原位监测方法及影响因素[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12): 66-72.

ZHAO Nanyang, JIN Shengxiang, WU Qiong, et al. In-situ monitoring method and influencing factors of in-mould melt rheological behavior in fine/micro injection molding[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(12): 66-72.

viscosity of the melt are limited. The proposed in-situ monitoring method for in-mould melt viscosity successfully characterizes the melt state inside complex fine moulds in injection molding, and the layout design of measurement modules in the mold flow channel does not affect the surface quality of the products. This method expands the monitoring techniques of in-mould processing rheology and provides reference for quality control development in injection-molded precision fine/micro structure products.

Keywords : injection molding ; in-mould monitoring ; processing rheology ; polymer ; viscosity

黏度作为材料的重要属性,衡量流体的黏滞性并反映流动阻力的大小,在聚合物加工、血液检测、石油生产等领域中可用于表征流体的流动状态,并最终影响生产过程的质量^[1-2]。为了解决注射成型过程熔体黏度监测的难题,研究人员对注塑喷嘴/料筒^[3-5]和模具^[6-7]中的结构进行了研究,并提出了一系列方法。通过在注塑喷嘴/料筒处引入温度和压力检测单元,实现了塑化单元处熔体信息的表征;通过利用模内的狭缝结构,开展了宽纵横比型腔内细微尺寸中熔体流动特异规律的研究。国内外相关代表性的研究成果有 Fernandez 等^[8]、Chen 等^[9]、Chen 等^[10]和 Chien 等^[11]、北京化工大学杨卫民教授团队^[12-13]、中南大学蒋炳炎教授团队^[14]等发表的文献。然而,塑化单元和模具间存在距离,利用塑化喷嘴/料筒检测得到的熔体流动状态与模内制品成型过程各工序位置的测量值之间存在偏差。且现有的模内检测方法受到狭缝结构局限,对小微注塑工况实施困难,传感器的布局也影响制品表面质量。本课题组前期研究^[15-17]证实了基于模内流道开展熔体黏度在线测量的可行性。然而,注射成型工艺参数对熔融聚合物流动的影响尚未明确,模内熔体加工流变性能调控的机理仍不清楚。

笔者以模内原位表征黏度及其影响因素为研究对象,通过在模内流道中布置测量模块,并集成可替换镶块结构,设计了一套可在注射成型过程中实现聚合物熔体黏度原位监测的模具。基于此,采用聚碳酸酯原料,探究了不同工艺参数和通道结构对于测量通道尺寸效应的影响,分析了塑化温度、注射压力和模具温度对熔融聚合物流动的变化规律,为小微注射成型过程中模内熔体加工流变学的检测及调控提供了可行手段。

1 理论方法

小微注射成型模内流道通常采用圆柱形结构,如图1所示。在柱坐标系中,熔体沿 z 轴方向流动, r 表示径向方向。测量通道两端的压差为 ΔP ,内部进出口压降分别采用 ΔP_1 和 ΔP_2 表示。通道的内径和长度分别为 D 和 L 。 Q 表示为熔体的体积流速。

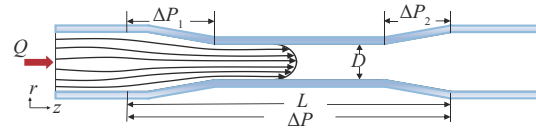


图1 模内熔体流动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of melt flow in-mould

基于哈根-泊肃叶原理,测量通道中熔体的表观剪切速率 $\dot{\gamma}_{w(app)}$ 和剪切应力 $\tau_{w(app)}$ 分别通过公式(1)和公式(2)计算得到。

$$\dot{\gamma}_{w(app)} = \frac{32Q}{\pi D^3} \quad (1)$$

$$\tau_{w(app)} = \frac{\Delta P}{4L} D \quad (2)$$

聚合物在熔融状态下表现出非牛顿特性。使用 Rabinowisch 原理^[18]和 Bagley 原理^[19-22]分别对剪切速率和剪切应力进行校正。其中, Rabinowitsch 原理用于修正熔体在壁面处的非牛顿行为, Bagley 原理用于修正测量通道的尺寸效应。由此可以获得聚合物熔体的真实剪切速率 $\dot{\gamma}_{w(real)}$ 和真实剪切应力 $\tau_{w(real)}$,具体见公式(3)和公式(4)。

$$\dot{\gamma}_{w(real)} = \frac{32Q}{\pi D^3} \left[\frac{3}{4} + \frac{d \ln \dot{\gamma}_{w(app)}}{4 d \ln \tau_{w(real)}} \right] \quad (3)$$

$$\tau_{w(real)} = \frac{\Delta P - e}{\frac{4L}{D}} \quad (4)$$

式(4)中, e 表示为测量通道的尺寸效应,可以通过进出口压降 ΔP_1 和 ΔP_2 进行计算,具体见公式(5)。根据 Chen 等^[10]的研究,入口压降和出口压降非常接近,也可采用 $e \approx 2\Delta P_1 \approx 2\Delta P_2$ 计算获得。

$$e = \Delta P_1 + \Delta P_2 \quad (5)$$

最终,熔体的原位黏度 $\eta_{w(real)}$ 可以通过公式(6)计算。

$$\eta_{w(real)} = \frac{\tau_{w(real)}}{\dot{\gamma}_{w(real)}} \quad (6)$$

2 实验设计

2.1 实验设备

2.1.1 模具设计

流变模具^[15-16]结构如图2所示。在该模具中设计了可替换的模具镶块结构,以形成不同长径比的

测量通道。其中,测量通道长度为25 mm,内径分别为1.5,2.0,2.5,3.0 mm, L/D 在10左右,确保熔体的充分发展。测量通道的两端分别安装了压力传感器(P_I 和 P_{II} ,瑞士Kistler公司,型号6183C),用于采集熔体状态参数。模具进口配备了热流道系统(加拿大Mold Master公司),以稳定模具内熔体的温度,减少聚合物原料的损失。

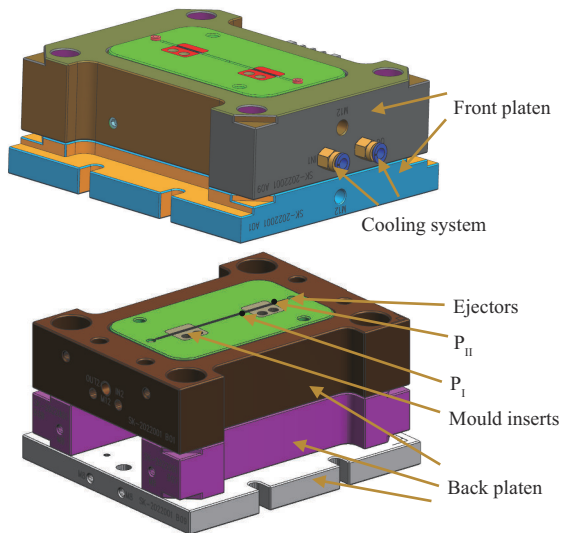


图2 模具结构设计

Fig. 2 Mould structure design

2.1.2 注射成型配套装置

采用日本住友公司的SE50EV-A型精密注射成型机开展模内监测试验。注射成型机的螺杆直径为18 mm,最大注射压力为280 MPa,最大注射速率为550 mm/s,最大锁模力为50 t。模温机选用型号为TW-200MA-K5。模内数据采集使用Kistler Type 5887A系统,前后模具闭合时触发2231A1开关,信号开始记录。

2.2 材料选择

实验采用原料为日本帝人公司生产的聚碳酸酯(PC AD5503)。基于精密光学制品成型加工的生产需求,对其在注射成型过程中模内熔体的流变进行检测。实验前,在120 °C环境下,使用烘干机对原料干燥8 h,以消除原料内部含水量对熔体成型过程测量的影响。

3 结果与讨论

注射成型工艺参数见表1,用于探究测量通道尺寸效应随注塑工艺和通道结构的影响规律,分析塑化温度、注射压力和模具温度对熔融聚合物流动的变化,掌握注射成型过程模内熔体加工流变变化

表1 小微注塑成型工艺参数组合

Tab. 1 Process parameters combinations of injection molding

Process parameters	Value
Injection velocity/(mm·s ⁻¹)	25, 50, 75, 100, 125, 150
Plasticizing temperature/°C	270, 290, 310
Injection pressure/MPa	150, 200, 250
Mould temperature/°C	80, 100, 120
Clamping force/t	35
Cooling duration/s	5
V/P switching position/mm	5.5

分析和调控的可行手段。基于表1进行注射成型试验,获得了不同测量通道下的成型制品,选用的工艺参数组合有效确保了制品型腔充填完整。其中,当注射速率大于150 mm/s时,实际注射速率难以达到理论注射速率,为确保稳定的速度平台区和有效的熔体状态测量,最大理论注射速率不超过150 mm/s,可参见文献[15]。

3.1 测量通道的尺寸效应

为了获得注射成型过程中熔体的原位黏度,需要确定测量通道的尺寸效应。通道的尺寸效应是指聚合物熔体在进入和离开通道后以弹性形式积累的能量,表现为压力的特异性。在给定尺寸的测量通道内,通过分析PC材料的压力变化曲线,得到通道的尺寸效应,如图3所示。具体地,根据压力曲线斜率的变化,确定测量通道进出口压降 ΔP_I 和 ΔP_2 ,最终计算出测量通道的尺寸效应 e 。熔体流入、流经和流出测量通道时,压力曲线记录的斜率会发生明显的变化,其中斜率恒定段为熔体流经通道阶段,曲线由平滑到斜率恒定段的压差记为 ΔP_I ,斜率由恒定到曲线平滑段的压差记为 ΔP_2 ,如图3a所示。

测量通道尺寸效应的结果如图3b~图3f所示。尺寸效应与测量通道长径比密切相关(图3b),并受熔体注射速率(图3c)和塑化温度(图3d)的影响。在25 mm/s的注射速率和290 °C的塑化温度下,当通道内径从3.0 mm缩小至1.5 mm,尺寸效应 e 从1.51 MPa增加至14.98 MPa,随通道内径的缩小显著增大,这是因为通道内径的减小增加了流道中的熔体剪切速率,PC材料具有黏弹特性,熔体在进入测量通道时产生剧烈的弹性效应,导致模内流动方向上的压力损失增大(图3b)。同时,测量通道尺寸效应受到注射速率的影响,在3.0 mm通道内径下,当注射速率从25 mm/s增大到150 mm/s,尺寸效应 e 从1.51 MPa上升至1.89 MPa,随注射速率增加略有增

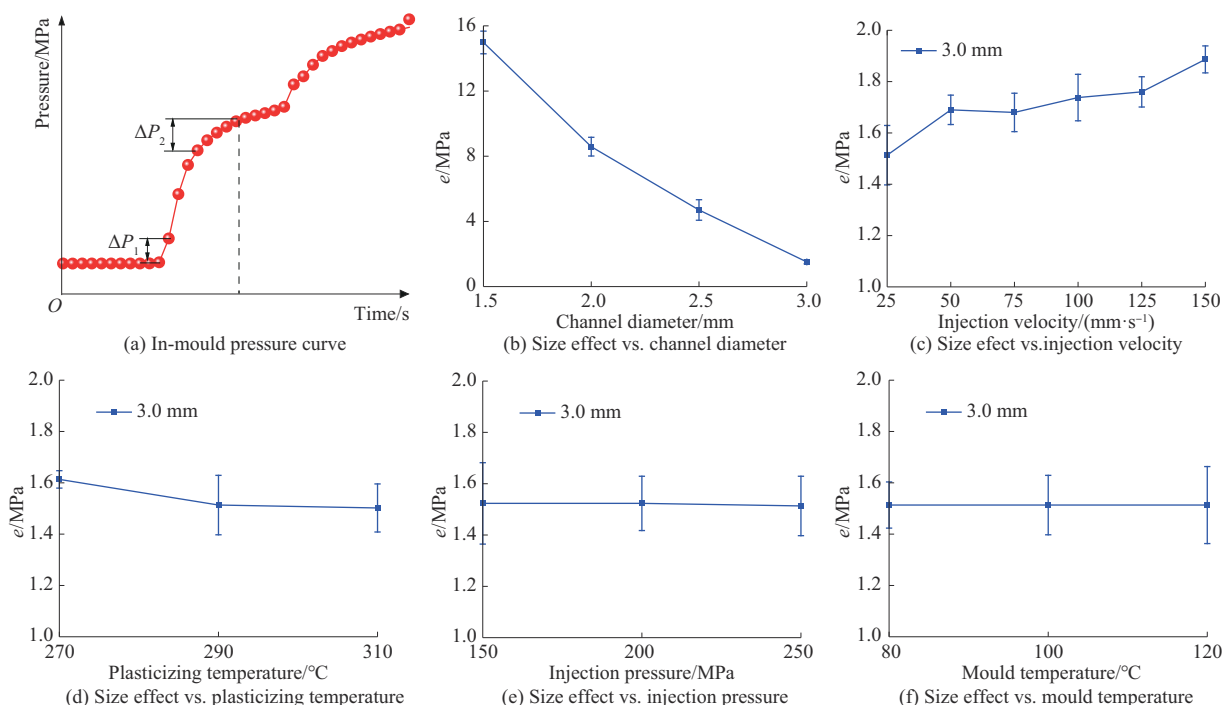


图3 注射成型模内检测压力曲线及测量通道尺寸效应变化

Fig. 3 In-mould pressure curves and size effect changes at measurement channel during injection molding process

大,造成熔体内部由于弹性能储存引起的压力损失增大(图3c)。塑化温度进一步能起到降低尺寸效应的作用,在3.0 mm通道内径下,当塑化温度从270 °C增大至310 °C,尺寸效应 e 从1.61 MPa降低至1.50 MPa(图3d),下降了7.3%。其他工艺参数如注射压力和模具温度对通道尺寸效应的影响较弱,基本不影响聚合物熔体进入测量通道的弹性效应,如图3e和图3f所示。由于压力曲线平滑到斜率恒定段的过渡和斜率由恒定段到曲线平滑段的过渡存在一定的误差,造成了图3d~图3f中误差棒存在较大偏差的现象。但是,通道尺寸效应 e 相较通道压差 ΔP 占比较小(两者存在一个数量级),通道尺寸效应 e 误差棒与通道压差 ΔP 存在两个数量级,通道尺寸效应 e 存在的细微偏差对剪切应力计算结果的影响可忽略。为此,真实剪切应力的计算过程采用通道尺寸效应 e 的均值代入。

3.2 塑化温度对熔体黏度的影响

不同塑化温度下获得的熔体流动状态变化如图4所示。塑化温度依次设置为270,290,310 °C,注射速率为25~150 mm/s,注射压力为250 MPa,模具温度为100 °C,开展注射成型试验。图4a显示了塑化温度变化对测量通道两端压差的影响。在内径为1.5 mm的测量通道中,当塑化温度从270 °C增加至310 °C,模内通道压降从65.48 MPa降至47.86

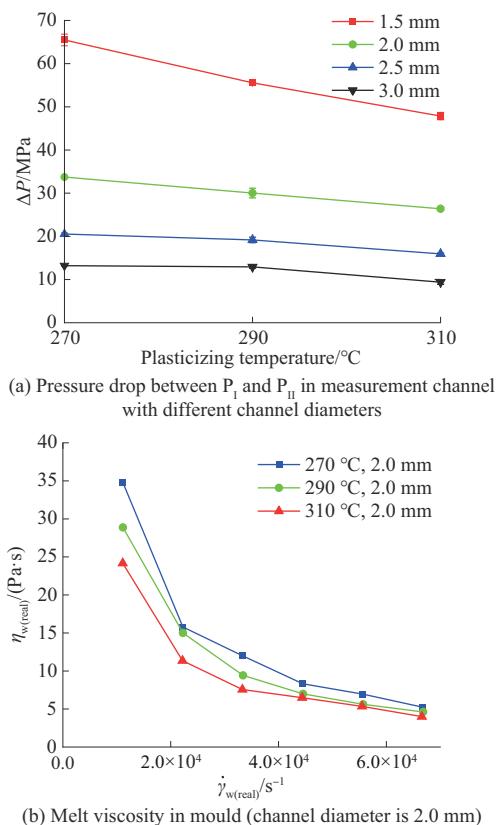


图4 塑化温度对模内熔体流动状态影响

Fig. 4 Influence of plasticizing temperature on in-mould melt flow state

MPa,显著降低。结果表明,塑化温度的升高降低了熔体流动的阻力,导致模内熔体压力损失减小。同

时,在相同塑化温度下,通道内径的增大可降低熔体的流动阻力。在270℃的塑化温度下,当通道内径从1.5 mm增大至3.0 mm,模内通道压降从65.48 MPa降至13.20 MPa,变化显著。

塑化温度显著影响了熔体黏度,如图4b所示。在25 mm/s的注射速率(剪切速率 $1.10 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$)下,聚合物熔体黏度在塑化温度270℃下为 $34.79 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,当塑化温度上升到310℃时,模内聚合物黏度降低至 $24.17 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,减小了30.53%。结果表明,升高塑化温度可以有效改善模内熔体的流动性,在较高塑化温度下,熔体黏度明显降低。随着注射速率的增加,塑化温度起到的作用也相同,在150 mm/s的注射速率(剪切速率 $6.67 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$)下,聚合物熔体的黏度在塑化温度270℃下为 $5.24 \text{ Pa}\cdot\text{s}$;当塑化温度上升到310℃时,获得熔体黏度为 $4.0 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,降低了23.66%,显著改善熔体的流动性。这是由于当温度高于玻璃化转变温度或者熔点时,聚合物熔体的黏度和温度服从Arrhenius-Frekel-Eyring (AFE)方程,塑化温度升高降低了大分子间的相互作用力,致使黏度降低,流动性改善。但当注射速率增大到一定程度(150 mm/s),聚合物熔体黏度进入了第二牛顿区,变化趋向平稳,分子缠结已不显著,弹性消失,显示出牛顿流体的特性,流动受注射速率影响减弱。

3.3 注射压力对熔体黏度的影响

不同注射压力下获得的熔体流动状态变化如图5所示。在塑化温度为290℃,注射速率为25~150 mm/s,注射压力分别为150,200,250 MPa,模具温度为100℃的条件下,开展了注射成型试验。图5a显示了注射压力变化对测量通道两端压差的影响。在1.5 mm内径的通道中,当注射压力从150 MPa增大到250 MPa,压降从51.42 MPa增大到55.55 MPa,轻微上升。结果表明,注射压力升高对熔体流动阻力的影响有限,压力损失略微增大,测量通道的压降变化有限。同时,在相同注射压力下,通道内径的增大可降低熔体的流动阻力。如在150 MPa的注射压力下,当通道内径从1.5 mm增大至3.0 mm,模内通道压降从51.42 MPa降至12.41 MPa,变化显著。

图5b显示了熔体黏度随注射压力的影响变化,在25 mm/s的注射速率(剪切速率 $2.65 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$)下,聚合物熔体黏度在注射压力为150 MPa时为20.65

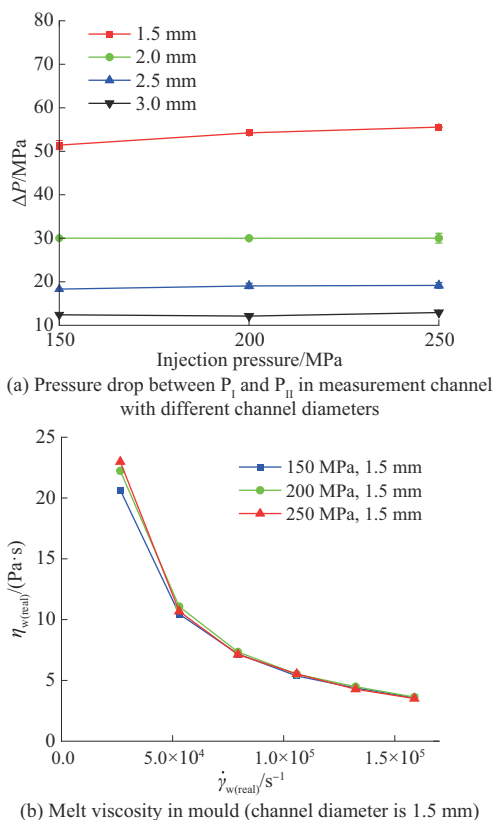


图5 注射压力对模内熔体流动状态影响

Fig. 5 Influence of injecting pressure on in-mould melt flow state

$\text{Pa}\cdot\text{s}$,当注射压力上升到250 MPa时,黏度为 $22.99 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,变化不大。结果表明,注射压力变化对模内聚合物熔体黏度的改善不显著,流动性基本不变。同样,在150 mm/s的较高注射速率(剪切速率 $1.57 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$)下,观察到相似的变化,聚合物熔体的黏度在注射压力150 MPa时为 $3.66 \text{ Pa}\cdot\text{s}$;当注射压力上升到250 MPa时,获得熔体黏度为 $3.51 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,变化不显著。这是由于在熔体模内充填过程中,前沿聚合物处于自由状态,熔体前沿界面压力接近于大气压力(0.1 MPa);又由于注射压力仅在保压阶段达到最大值,在充填阶段,注射压力对熔体流动性的影响有限,故测量得到的黏度在不同注射压力下非常接近。

3.4 模具温度对熔体黏度的影响

不同模具温度下获得的熔体流动状态变化如图6所示。在塑化温度为290℃,注射速率为25~150 mm/s,注射压力为250 MPa,模具温度分别为80,100,120℃的条件下,开展了注射成型试验。图6a显示了模具温度变化对测量通道两端压差的影响。在内径为1.5 mm的测量通道中,当模具温度从80℃增大至120℃,压降从54.39 MPa减少到53.65

MPa,测量通道的压降变化有限。这表明模具温度升高对熔体流动阻力的影响有限,压力损失基本不变。同时,在相同模具温度下,通道内径的增大可降低熔体的流动阻力。如在80℃的模具温度下,当通道内径从1.5 mm增大至3.0 mm,模内通道压降从54.39 MPa降至12.87 MPa,变化显著。

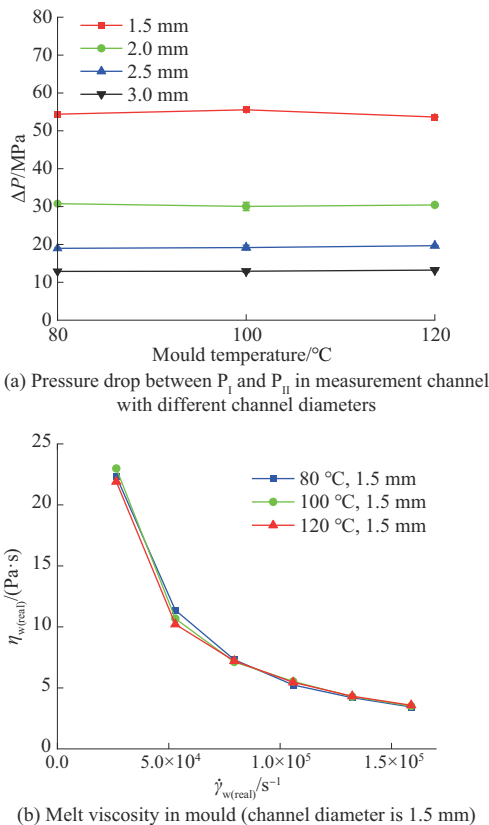


图6 模具温度对模内熔体流动状态影响
Fig. 6 Influence of mould temperature on in-mould melt flow state

图6b显示了熔体黏度随模具温度的影响变化,在25 mm/s的注射速率(剪切速率 $2.65 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$)下,聚合物熔体黏度在模具温度80℃时为22.33 Pa·s,当模具温度升到120℃时,黏度下降至21.91 Pa·s,降低了1.88%。结果发现,模具温度变化对熔体黏度的改善有限,基本不影响流动能力。同时,在150 mm/s的注射速率(剪切速率 $1.57 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$)下可以得到相近的结论,聚合物熔体黏度在模具温度80℃时为3.43 Pa·s;当模具温度上升到120℃时,获得熔体黏度为3.57 Pa·s,变化了4.08%。考虑在模内注射条件下,注射成型聚合物的充填过程时间较短(<0.3 s),聚合物和模具金属之间热传导作用有限,所以在模内熔体黏度检测过程中,模具温度对聚合物熔体流动性的影响不显著。

4 结论

提出了一种注射成型聚合物熔体模内黏度原位监测方法,通过在流道中布置测量模块,设计可替换镶块结构,开发了一种具备流变检测功能的模具。采用PC原料,探究了测量通道尺寸效应在不同注塑工艺和通道结构的变化规律,分析了塑化温度、注射压力和模具温度对熔融聚物流动的变化,建立了小微注射成型过程的模内熔体流变学检测新方法。主要结论如下。

(1)测量通道尺寸效应与通道尺寸密切相关,并且受熔体注射速率和塑化温度的影响。通道内径的减小、注射速率的增大、塑化温度的降低,都会导致模内熔体以弹性形式积累更多的能量,流动方向上的压力损失增大。

(2)小微注射成型模内熔体原位黏度主要受到塑化温度的作用。塑化温度升高减弱了大分子间的相互作用力,导致黏度降低,流动性改善。而注射压力和模具温度对模内熔体黏度的调节影响较小,对模内熔体流动状态的影响不显著。

聚合物熔体模内原位黏度监测方法实现了复杂模具内部熔体状态的表征,探明的小微测量通道尺寸效应及模内加工流变学规律,为细微尺度下聚合物特异流变行为相关影响因素分析研究提供了借鉴。

参考文献

- [1] ZHAO N Y, LIU J F, SU M Y, et al. Measurement techniques in injection molding: A comprehensive review of machine status detection, molten resin flow state characterization, and component quality adjustment[J]. Measurement, 2024, 226. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114163.
- [2] 柳天磊,杜遥雪,何显运,等.注塑机用波状型分离螺杆混炼性能数值模拟[J].工程塑料应用,2021,49(6):107-112.
LIU Tianlei, DU Yaoxue, HE Xianyun, et al. Numerical simulation on mixing properties of wave barrier screw in injection moulding machine[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(6):107-112.
- [3] 翟家驹,瞿金平.偏心转子挤出机制备LLDPE/UHMWPE共混物的形态、流变行为和力学性能的研究[J].塑料工业,2021,49(6):71-77.
ZHAI Jiaju, QU Jinping. Study on morphology, rheological behavior and mechanical properties of LLDPE/UHMWPE blends prepared by eccentric rotor extruder[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(6):71-77.
- [4] 秦森,何和智,张涛,等.塑料体积脉动注射成型技术研究[J].中国塑料,2023,37(9):96-101.
QIN Sen, HE Hezhi, ZHANG Tao, et al. Study on volume-pulsation injection-molding technology for plastics[J]. China Plastics,

- 2023,37(9):96–101.
- [5] 瞿金平,吴婷.体积拉伸流变塑化输运技术助力材料创新发展[J].科技导报,2020,38(14):54–62.
- QU Jinping, WU Ting. Advanced processing technology of polymer materials helps material innovation and development[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(14):54–62.
- [6] HOPMANN C, THEUNISSEN M, HEINISCH J. Online analysis of melt viscosity during injection moulding with a hot runner rheometer[J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2055(1). DOI: 10.1063/1.5084866.
- [7] TROTTA G, STAMPONE B, FASSI I, et al. Study of rheological behaviour of polymer melt in micro injection moulding with a miniaturized parallel plate rheometer[J]. Polymer Testing, 2021, 96. DOI:10.1016/j.polymertesting.2021.107068.
- [8] FERNANDEZ A, MUNIESA M, JAVIERRE C. In-line rheological testing of thermoplastics and a monitored device for an injection moulding machine: Application to raw and recycled polypropylene [J]. Polymer Testing, 2014, 33:107–115.
- [9] CHEN C S, CHEN S C, LIAW W L, et al. Rheological behavior of POM polymer melt flowing through micro-channels[J]. European Polymer Journal, 2008, 44(6):1 891–1 898.
- [10] CHEN S C, TSAI R I, CHIEN R D, et al. Preliminary study of polymer melt rheological behavior flowing through micro-channels[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2005, 32(3):501–510.
- [11] CHIEN R D, JONG W R, CHEN S C. Study on rheological behavior of polymer melt flowing through micro-channels considering the wall-slip effect[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005, 15(8):1 389–1 396.
- [12] XU Y X, XIE P C, FU N H, et al. Self-optimization of the V/P switchover and packing pressure for online viscosity compensation during injection molding[J]. Polymer Engineering & Science, 2022, 62(4):1 114–1 123.
- [13] 许宇轩.注塑成型熔体粘度波动定量表征及在线补偿控制方法[D].北京:北京化工大学,2023.
- XU Yuxuan. Quantitative characterization and online Compensation method of melt viscosity Fluctuations during injection molding[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2023.
- [14] WU W Q, ZHAO B S, MO F, et al. In-line steady shear flow characteristics of polymer melt in rectangular slit cavities during thin-wall/micro injection molding[J]. Materials & Design, 2022, 223. DOI:10.1016/j.matdes.2022.111266.
- [15] ZHAO N Y, LIU J F, BI M C, et al. In situ flow state characterization of molten resin at the inner mold in injection molding[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 141. DOI: 10.1002/app.55018.
- [16] 许忠斌,赵南阳,陈先忧,等.一种具有模内流变在线测量功能的微注塑模具及测控方法:CN114407314B[P].2024-04-05.
- XU Zhongbin, ZHAO Nanyang, CHEN Xianyou, et al. A micro injection mold with online measurement function for in mold rheology and its measurement and control method:CN114407314B [P].2024-04-05.
- [17] ZHAO N Y, BI M C, LIU J F, et al. In-situ melt flowability detection and product quality evaluation in injection molding: A simplified approach[J]. Measurement, 2024, 238. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115320.
- [18] 朱新军.丙烯酸聚合物/1-丁基-3-甲基咪唑氯化物流体特性及纺丝挤出动力学模拟[D].上海:东华大学,2013.
- ZHU Xinjun. Fluid properties and dynamic simulation of acrylic copolymer/1-butyl-3-methylimidazolium chloride solution during dry-jet wet spinning[D]. Shanghai:Donghua University, 2013.
- [19] 陈晋南,何吉宇.聚合物流变学及其应用[M].北京:中国轻工业出版社,2018.
- CHEN Jinnan., HE Jiyu. Polymer rheology and its application[M]. Beijing:China Light Industry Press, 2018.
- [20] 李泽钦.毛细管流变仪内磁流变液的大剪切率流变特性实验与仿真研究[D].汕头:汕头大学,2023.
- LI Zeqin. Experimental and numerical study on rheological properties of a large shear rate magnetorheological flow in a capillary rheometer[D]. Shantou:Shantou University, 2023.
- [21] 孟利民,吴大鸣,刘颖.微尺度下压力对聚丙烯剪切黏度影响研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2017,44(3):107–12.
- MENG Limin, WU Daming, LIU Ying. Effect of pressure on the shear viscosity of polypropylene at a micro scale[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2017, 44(3):107–112.
- [22] 张凯.聚丙烯碳基纳米复合材料微尺度流变实验研[D].北京:北京化工大学,2017.
- ZHANG Kai. The rheological properties of polypropylene/carbon-based nanocomposites in microscale channels[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2017.