

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.01.009

不同工艺条件下 PS/ScCO₂ 均相体流变特性研究

王思鹏¹, 黄兴元^{1,3}, 王都阳¹, 李孟山², 柳和生³

(1. 南昌大学江西省高性能精确成型重点实验室, 南昌 330031; 2. 赣南师范大学物理与电子信息学院, 江西赣州 341000;

3. 东华理工大学, 江西省聚合物微纳制造与器件重点实验室, 南昌 330013)

摘要: 通过建立含有类似锥板流变仪结构的实验平台对不同的温度、压力、剪切速率以及 CO₂ 质量分数等工艺条件下聚苯乙烯 (PS)/超临界 CO₂ (ScCO₂) 均相体的流变性能展开研究。结果表明: 压力的升高会增加均相体的黏度, 压力由 7.5 MPa 升高到 10.5 MPa 时, CO₂ 质量分数为 0.5% 的均相体黏度增加了 140 Pa·s, 约为原来的 4.6%; 增加温度则会降低均相体黏度, 而且随着温度的升高, 黏度的下降趋势在逐渐减小, 温度从 443.15 K 逐渐增加到 473.15 K 时, CO₂ 质量分数为 0.5% 的均相体黏度的减少值分别为 778, 482, 327 Pa·s; 当均相体中 CO₂ 质量分数逐渐增加时, 其黏度变化呈线性下降, CO₂ 质量分数每升高 0.1%, 均相体黏度下降约为 52 Pa·s; 加大剪切速率可以大幅度降低均相体的黏度, 当 CO₂ 质量分数为 0.5% 的均相体在剪切速率从 (120/π)/s 增加到 (240/π)/s 时其黏度下降趋势最大, 值为 40%。

关键词: 微孔塑料; 均相体; 流变性能; 超临界 CO₂

中图分类号: TQ320.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)01-0046-05

Reserach on Rheological Properties of PS/ScCO₂ Homogeneous Body Under Different Process Conditions

Wang Sipeng¹, Huang Xingyuan^{1,3}, Wang Duiyang¹, Li Mengshan², Liu Hesheng³

(1. Nanchang University, Jiangxi Key Laboratory of High Performance Precision Molding, Nanchang 330031, China;

2. Institute of physics and electronic information, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China;

3. East China University of Technology, Jiangxi Key Laboratory of Polymer Micro Nano Manufacturing and Devices, Nanchang 330013, China)

Abstract: The rheological properties of polystyrene (PS) / supercritical CO₂ (ScCO₂) homogeneous phase under different process conditions such as temperature, pressure, shear rate and CO₂ mass fraction were studied by establishing an experimental platform with a similar cone-and-plate rheometer structure. The results show that the increase of pressure will increase the viscosity of the homogeneous body, when the pressure increases from 7.5 MPa to 10.5 MPa, the homogeneous body viscosity with 0.5% CO₂ mass fraction increases by 140 Pa·s, which is about 4.6% of the original viscosity. The increase of temperature will decrease the viscosity of the homogeneous body, and with the increase of temperature, the decreasing trend of viscosity will gradually decrease, when the temperature increased gradually from 443.15 K to 473.15 K, the decrease values of homogeneous body viscosity with 0.5% CO₂ mass fraction are 778, 482, 327 Pa·s, respectively. When the CO₂ mass fraction in the homogeneous body increased gradually, the viscosity change decreases linearly, when the mass fraction of CO₂ increases by 0.1%, the viscosity of the homogeneous body decreases about 52 Pa·s. Increasing the shear rate can greatly reduced the viscosity of the homogeneous body, when the shear rate increased from (120/π)/s to (240/π)/s, the downtrend of viscosity of the homogeneous body with a CO₂ mass fraction of 0.5% is the largest, with a value of 40%.

Keywords: microcellular plastics; homogeneous body; rheological property; supercritical CO₂

微孔塑料是指泡孔直径为 0.1~10 μm、泡孔密度为 10⁹~10¹⁵ 个/cm³、材料密度相比发泡前可减少 5%~95% 的新型泡沫塑料^[1], 与传统泡沫塑

料相比拥有密度小、高强度以及优良吸音和吸能等优异性能^[2]。超临界 CO₂ 是 CO₂ 一种介于气体和液体之间的状态 (临界温度为 31.8℃, 临界压力为

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51403615, 51663001, 51863014), 南昌大学研究生创新专项资金项目 (CX2018040)

通讯作者: 黄兴元, 教授, 博士生导师, 主要从事高分子材料成型加工研究 E-mail: huangxingyuan001@126.com

收稿日期: 2019-11-07

引用格式: 王思鹏, 黄兴元, 王都阳, 等. 不同工艺条件下 PS/ScCO₂ 均相体流变特性研究 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(1):46-50, 62.

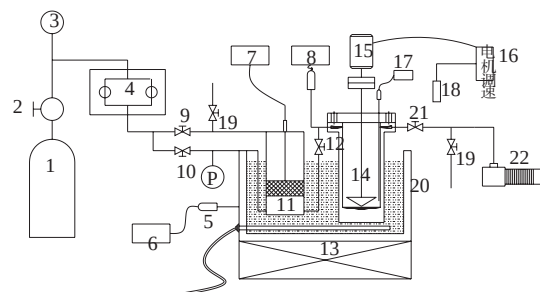
Wang Sipeng, Huang Xingyuan, Wang Duiyang, et al. Reserach on rheological properties of PS / ScCO₂ homogeneous body under different process conditions[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):46-50, 62.

7.38 MPa),兼具气体和液体的优点:黏度小、扩散系数大,接近于气体;密度大、热容大、导热性能好接近于液体^[3];且价廉易得,安全无毒,与聚合物不易发生反应,因此广泛用于微孔塑料发泡中。在微孔塑料挤出成型过程中,温度、压力、超临界流体质量分数以及挤出机螺杆转速等工艺条件会改变超临界流体/聚合物均相体的流变性能,而均相体的流变性能则会直接影响泡孔成核及其生长过程,进而影响最终制品的泡孔尺寸和密度^[4]。对于如何快速有效地形成均匀、稳定的微孔结构是微孔塑料成型研究的难点和热点^[5]。因此很有必要对不同温度、压力、剪切速率以及超临界 CO₂ 质量分数等条件下均相体流变特性进行研究,为设计和优化工艺参数提供指导。现阶段国内学者对这方面的研究较少,Wan Chen 等^[6]利用高压流变仪,研究了压力对高密度聚乙烯(PE-HD)和低密度聚乙烯(PE-LD)流变性能的影响,结果表明:在低压下,熔体的黏度对压力十分敏感,当压力增加到较高值时,PE-HD 的黏度趋于平稳,PE-LD 的黏度则呈上升趋势。国外学者在这方面的研究较多,Lan Hung-Yu 等^[7]研究了聚丙烯(PP)/ScCO₂ 均相体的流变特性后发现在剪切速率小于 2500/s 时,其均相体的黏度随着超临界流体的增加而显著降低,然而随着剪切速率的升高,观察到的黏度的减少量逐渐减少。M. Lee 等^[8-9]研究了 CO₂ 质量分数在 0~4% 时均相体黏度的变化情况,其结果显示:随着 CO₂ 溶解量加大,聚合物的黏度是逐渐减少的。J. R. Royer 等^[10-11]测定了在超临界 CO₂ 条件下聚苯乙烯均相体的黏度,其结果表明根据工艺条件和 CO₂ 浓度的不同,最高可将聚合物熔体的黏度降低 80%。为更加系统了解不同的工艺条件对均相体流变性能的影响,并合理设置工艺参数来改善均相体的流变性能从而提高微孔塑料成品质量,笔者通过建立含有类似锥板流变仪结构的实验平台对不同的温度、压力、剪切速率以及 CO₂ 质量分数等工艺条件下,聚苯乙烯(PS)/ScCO₂ 均相体的流变性能展开研究。

1 实验部分

1.1 实验装置

在本课题组原有的装置^[12]中增加了电流检测仪和锥形混合元件以此来测量不同的温度、压力、剪切速率以及 CO₂ 质量分数等条件下 PS/ScCO₂ 均相体的黏度。



1—CO₂ 气瓶;2—减压阀;3—压力表;4—增压泵;5—压力表;
6—温控仪;7—位移传感器;8—压力表;9—保压阀;10—补气阀;
11—气缸和气缸活塞;12—流入阀;13—升降台;14—反应釜体;
15—搅拌电机;16—调速器;17—温度传感器;18—电流监测仪;
19—放空阀;20—油浴池;21—真空阀;22—真空泵

图1 装置示意图

1.2 装置的工作原理

将定量的 PS 放入反应釜体 14 中保持密闭,将总量一定的 ScCO₂ 通入气缸和气缸活塞 11 内保持密闭,增压泵 4 提供所需的实验压力,油浴池 20 提供所需的实验温度,待温度和压力到达实验条件时,打开流入阀 12,气缸活塞 11 下部分的 CO₂ 进入反应釜体 14 后两者压力相等,通过开闭保压阀 9 使压力在整个溶解过程中维持在实验条件下,在此恒温恒压基础上进行溶解实验,位移仪表 7 实时记录活塞的位移从而计算出溶解在 PS 中 CO₂ 的体积,并进一步计算出 PS/ScCO₂ 均相体中 CO₂ 的质量分数。反应釜体 14 中的锥形混合元件相当于锥板流变仪,一方面可以提供实验所需的剪切速率;另一方面可以通过测量其转矩来转化成均相体黏度,转矩通过电流检测仪 18 (由电流变送器和无纸记录仪组合而成)测量搅拌电机 15 的工作电流所得。

1.3 实验安排与实验仪表

(1) 实验安排。

共进行了 10 组溶解实验,实验安排见表 1。

表 1 实验安排

组别	温度/K	压力/MPa	剪切速率/s ⁻¹
1	443.15	7.5	120/π
2	453.15	7.5	120/π
3	463.15	7.5	120/π
4	473.15	7.5	120/π
5	443.15	8.5	120/π
6	443.15	9.5	120/π
7	443.15	10.5	120/π
8	443.15	7.5	240/π
9	443.15	7.5	360/π
10	443.15	7.5	480/π

(2) 实验仪器。

实验中的测量仪器见表2。

表2 实验仪器

仪器名称	型号	量程和精度	品牌
温度数显表	AI-208	0~300℃, ±0.1℃	宇电
数字压力表	WKSXYL-131	±0.4%	曼伦
压力传感器	SIN-P300M	-0.1~60MPa, ±0.5%	sinomeasure
位移传感器	LWH-300mm	0~300mm, ±0.05%	NOVCK
电流变送器	MIK-DJI	0~5A, ±0.5%	美控
无纸记录仪	MIK-R200D	0~5A, ±0.5%	美控

1.4 实验原料

干燥的通用级 PS 粒料: 纯度 ≥ 99.7%, 相对分子质量为 1×10^5 , 密度 1.05 g/cm^3 , 熔点为 150°C , 台化聚苯乙烯有限公司;

CO_2 : 纯度 ≥ 99.5%, 南昌国辉气体有限公司。

1.5 实验步骤

(1) 在反应釜体 14 内加入 PS 粒料后, 关闭保压阀 9、补气阀 10 和放空阀 19, 打开流入阀 12 和真空阀 21, 对釜体内部抽真空处理后, 关闭真空阀 21 和流入阀 12。

(2) 油浴池 20 加热反应釜 14 及活塞缸 11, 使其内部温度达到 160°C 时, 启动搅拌机 15 设定转速, 同时电流检测仪 18 开始工作, 记录搅拌机 15 的工作电流直到实验结束 (频率 1 次/s)。

(3) 待温度升高到实验所需温度 T 时, 打开补气阀 10, 通入 CO_2 至活塞缸内达到较高压力 (高于实验压力 p) 后, 关闭补气阀, 静置一段时间, 待活塞缸内部温度重新达到 T 。

(4) 打开流入阀 12 使 CO_2 进入反应釜 14, 通过保压阀 9 的开启与关闭控制釜内压力, 使釜内压力于整个实验过程中均为 p 。

(5) 计算机记录位移传感器 7 输出的位移信号 (频率 1 次/s), 直到位移不随时间变化为止。

(6) 实验结束, 开启放空阀 19, 释放废气后安全拆卸仪器并取出混合物料。

2 相关计算

2.1 CO_2 溶解量的计算

本实验中将位移传感器记录的位移数据转化为 CO_2 质量分数的计算方法见文献^[12]。

2.2 均相体黏度的计算

图2是锥形混合元件 ($\theta_0=3^\circ$) 结构示意图, 其原理相当于锥板流变仪^[13], 当锥顶角 θ_0 很小的情况下, 一般是认为小于 4° 时, 此时在锥形混合元件与

反应釜体底面间隙中的流动可以视为简单剪切流动, 所以剪切速率是近似恒定的, 即当其旋转角速度恒定时剪切速率也是恒定的, 故可以为实验提供所需的剪切速率, 通过测量其转矩可以转化为均相体的黏度。

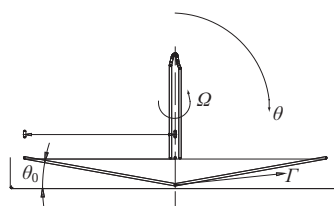


图2 锥形混合元件示意图

转矩 T 的表示如下:

$$T = 2\pi \int_0^R \sigma_{\theta\phi} r^2 dr = \frac{2}{3} \pi R^3 \sigma_{\theta\phi} \quad (1)$$

式中: R 为混合元件的半径, m; $\sigma_{\theta\phi}$ 为剪切应力, Pa;

剪切应力可表示为:

$$\sigma_{\theta\phi} = -\eta \dot{\gamma}_{\theta\phi} = -\eta \frac{\sin \theta}{r} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{V_\phi}{\sin \theta} \right) \right] \approx \eta \frac{\Omega}{\theta_0} \quad (2)$$

式中: $\dot{\gamma}_{\theta\phi}$ 为剪切速率, /s; Ω 为混合元件的旋转角速度, rad/s; θ_0 为混合元件锥顶角, $^\circ$ 。

结合 (1)、(2) 两式有:

$$\eta = \frac{3\theta_0 T}{2\pi R^3 \Omega} \quad (3)$$

锥形混合元件的扭矩主要是通过图1中的18电流检测仪所测得的电流来得出。具体计算公式如下:

$$T = 9.55 \frac{U \cdot I}{n} \quad (4)$$

式中: U 为工作电压, V; I 为有效电流, A; n 为混合元件的转速, r/min。

因此只需测量出不同条件下, 每个时刻锥形混合元件的工作电流值就可计算出该时刻均相体的黏度。将同一时刻下 PS/ScCO₂ 均相体的黏度值与 CO_2 的溶解量对应起来, 就可以得出不同的温度、压力、剪切速率以及 CO_2 质量分数等条件下, PS/ScCO₂ 均相体黏度的变化曲线。

3 结果与讨论

3.1 CO_2 质量分数对 PS/ScCO₂ 均相体流变性能的影响

图3是 $T=443.15 \text{ K}$, $P=7.5 \text{ MPa}$, $\dot{\gamma}=(120/\pi)/\text{s}$ 条件下, PS/ScCO₂ 均相体剪切黏度随 CO_2 质量分数变化的曲线图。由图3可知, 随着 CO_2 质量分数增加, 均相体剪切黏度近似呈线性下降趋势。

当均相体中 CO₂ 质量分数为 0.1% 时,其剪切黏度为 3430 Pa·s, CO₂ 质量分数为 2.5% 时,其均相体剪切黏度为 2185 Pa·s,因此 PS/ScCO₂ 均相体中 CO₂ 质量分数的质量分数每升高 0.1% 时,其剪切黏度下降约为 52 Pa·s。这是因为依据经典均相成核理论,气泡的成核率与聚合物单位体积内气体分子的浓度呈现正相关,随着聚合物分子内 CO₂ 分子浓度越高,一定时间内单位体积的泡孔成核率也越大^[14],这些 CO₂ 分子溶解在聚合物分子当中起到了润滑作用,减少了聚合物分子之间的摩擦。考虑到实际发泡过程中为了获得尽可能多的稳定均匀的泡孔,一般是在均相体中溶解的 CO₂ 达到饱和后才进行发泡,而均相体的黏度会影响其成品的挤出速度以及快速降压阶段的压降率,另外 CO₂ 质量分数也是一个不易控制的工艺参数,所以 CO₂ 质量分数只作为一个计算均相体黏度的定量条件,并以此为其他工艺条件做参考。

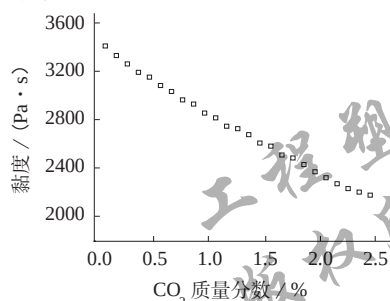
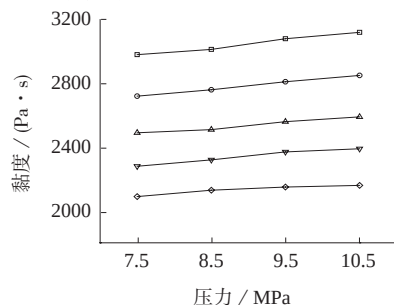


图3 不同 CO₂ 质量分数时 PS/ScCO₂ 均相体流变性能

3.2 压力对 PS/ScCO₂ 均相体流变性能的影响

图4是 $T=443.15\text{K}$, $\dot{\gamma}=(120/\pi)/\text{s}$, 不同的 CO₂ 质量分数条件下, PS/ScCO₂ 均相体剪切黏度随压力变化的曲线图。



CO₂质量分数: ◻—0.5%; ◯—1.0%; ◐—1.0%; ▽—1.0%; ◇—2.5%

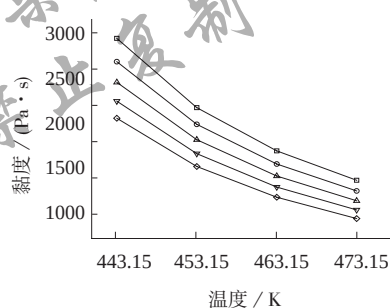
图4 不同压力时 PS/ScCO₂ 均相体流变性能

由图4可知:随着 PS/ScCO₂ 均相体的压力升高,其黏度的变化近似呈线性增加,不过增加的趋势较小,压力由 7.5 MPa 升高到 10.5 MPa 时, CO₂ 质量分数为 0.5% 的均相体黏度增加了 140 Pa·s,约

为原来的 4.6%。这是由于压力的增加导致聚合物分子链段压缩聚集从而使其流动性降低,内摩擦增大,然而这样引起的黏度增加是不明显的,因为对于高聚物而言,其分子链之间的缠结现象才是影响其黏度的主要因素;尤其是在溶入 CO₂ 分子后,聚合物分子之间产生一定的活动空间,使得均相体的黏度降低,但随着压力小部分的增大,这些活动空间并不会大部分减少,因此压力对均相体黏度的影响就变得不太明显了。在微孔塑料气泡成核阶段,降低压力是均相体中的气体大量析出的手段之一,但压力的降低同时会导致均相体剪切黏度的降低,为了获得品质更优的发泡产品,压力并不作为控制均相体黏度的主要因素。

3.3 温度对 PS/ScCO₂ 均相体流变性能的影响

图5是 $P=7.5\text{ MPa}$, $\dot{\gamma}=(120/\pi)/\text{s}$, 不同的 CO₂ 质量分数条件下, PS/ScCO₂ 均相体系剪切黏度随温度变化的曲线图。



CO₂质量分数: ◻—0.5%; ◯—1.0%; ◐—1.0%; ▽—1.0%; ◇—2.5%

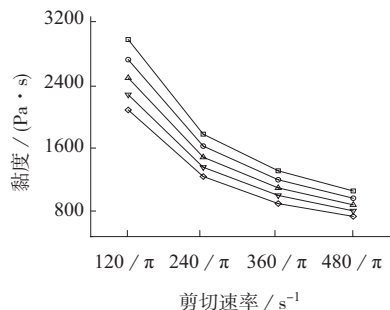
图5 不同温度时 PS/ScCO₂ 均相体流变性能

由图5可知,升高温度会降低 PS/ScCO₂ 均相体的剪切黏度,而且下降的黏度值是较大的,但随着温度的继续升高,这种下降的幅度在减小,当温度从 443.15 K 每 10 K 增加到 473.15 K 时, CO₂ 质量分数为 0.5% 的均相体黏度的减少值分别为 778, 482, 327 Pa·s。此外,由图还可以看出,随着均相体中 CO₂ 质量分数的增加,升高温度导致的 PS/ScCO₂ 均相体黏度降低的值也在逐渐变小,也就是说随着均相体中溶解的 CO₂ 接近于饱和,均相体的黏度会对温度变得愈发不敏感。这是因为随着温度的升高,聚合物内部分子热运动增强,使其分子间的相互作用力减弱,分子链间的缠结得以解开,导致其流动性增加,从而黏度降低,但随着均相体中溶解的 CO₂ 增多,其分子链间的自由体积会越来越被 CO₂ 分子占据,由温度升高引起的自由体积增加则会越来越少,黏度的下降幅度自然就变小了。温度是微

孔塑料成型中最为关键的一个因素,在气泡成核阶段,通过升高温度和降低压力改变均相体的热平衡状态使 CO_2 气体大量析出,同时又严重影响着最终均相体中 CO_2 质量分数以及均相体的黏度,因此这是一个需要综合各方面考虑的因素。

3.4 剪切速率对 PS/ScCO₂ 均相体流变性能影响

图 6 是 $T=443.15\text{K}$, $P=7.5\text{ MPa}$, 不同的 CO_2 质量分数条件下, PS/ScCO₂ 均相体剪切黏度随剪切速率变化的曲线图。



CO_2 质量分数: $\square$ —0.5%; $\circ$ —1.0%; $\triangle$ —1.0%; ∇ —1.0%; $\diamond$ —2.5%

图 6 不同剪切速率时 PS/ScCO₂ 均相体流变性能

由图 6 可知,剪切速率 γ 的升高会导致均相体的黏度降低,而且这种降幅是显著的。例如:在 CO_2 质量分数为 0.5% 条件下,剪切速率从 $(120/\pi)/\text{s}$ 升高到 $(240/\pi)/\text{s}$,均相体的黏度降低了约 40%;剪切速率从 $(240/\pi)/\text{s}$ 升高到 $(360/\pi)/\text{s}$,均相体的黏度降低了约 25%;剪切速率从 $(360/\pi)/\text{s}$ 升高到 $(480/\pi)/\text{s}$,均相体的黏度降低了约 19%。由此可知,随着剪切速率的增加,均相体黏度下降的趋势在逐渐减小,而且,随着 CO_2 质量分数的增加,升高同样数值的剪切速率对 PS/ScCO₂ 均相体黏度的降低幅度也在逐渐减小。这是因为在剪切速率不够高的时候,剪切产生的应力不足以破坏聚合物分子链之间的缠结点结构,因此均相体的黏度较大,而当剪切速率增加到足够大的时候,聚合物分子链之间的缠结得以打开,均相体黏度则大幅度下降;此外,随着 CO_2 质量分数的增加,两者对均相体的降黏作用会相互制约。剪切作为微孔塑料挤出成型中降低均相体黏度的一个重要工艺参数,不仅可以加快螺杆挤出的速度还可以缩短均相体中 CO_2 达到饱和的时间,实际加工中往往采用较高的剪切速率。

4 结论

通过建立含有类似锥板流变仪结构的实验平台对不同条件下(温度、压力、剪切速率、 CO_2 质量

分数), PS/ScCO₂ 均相体黏度值的测量和分析,得到以下结论:

(1) 剪切对 PS/ScCO₂ 均相体流变特性具有重要的影响,在形成 PS/ScCO₂ 均相体时,通过剪切可以大大降低均相体的黏度。

(2) 增加温度可以降低 PS/ScCO₂ 均相体的黏度,但增加温度会导致 CO_2 在 PS 中的溶解度下降,会影响到最终均相体中 CO_2 质量分数。

(3) 随着均相体中 CO_2 质量分数的增加,剪切速率对其黏度的影响会逐渐减小,这表明在实际加工中,通过施加剪切可以大大提高 ScCO₂ 在聚合物熔体中的溶解速度,这对快速形成 PS/ScCO₂ 均相体具有重要的实际意义。

参考文献

- [1] 高长云,周南桥,彭响方.微孔发泡过程中聚合物/超临界 CO_2 均相体系形成的研究[J].工程塑料应用,2003,31(10):32-34.
Gao Changyun, Zhou Nanqiao, Peng Xiangfang. Study on the formation of polymer/supercritical carbon dioxide solution in the foaming processing of microcellular plastics[J]. Engineering Plastics Application, 2003, 31(10):32-34.
- [2] Mills N J. Polymer foams handbook: Engineering and biomechanics applications and design guide[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007.
- [3] 张艳君,刘亚青,谢江波,等.超临界 CO_2 在连续挤出微孔塑料中的应用[J].合成树脂及塑料,2006,23(4):72-75.
Zhang Yanjun, Liu Yaqing, Xie Jiangbo, et al. Application of supercritical CO_2 in preparation of microcellular plastics in continuous extrusion[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2006, 23(4):72-75.
- [4] 谭逸伦,陈迎新,李俊祥.聚乙烯微孔塑料研究进展[J].中国塑料,2019,33(1):124-132.
Tan Yilun, Chen Yingxin, Li Junxiang. Research progress in polyethylene microcellular foams[J]. China Plastics, 2019, 33(1):124-132.
- [5] 段翔宇,柳和生,黄兴元,等.不同工艺下反应釜内 PS/ CO_2 均相体系流变性能模拟[J].工程塑料与应用,2017,45(7):52-55
Duan Xiangyu, Liu Hesheng, Huang Xingyuan, et al. Simulation of rheological behavior of PS/ CO_2 homogeneous system in reactor under different process conditions[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(7):52-55
- [6] Wan Chen, Sun Gangwei, Liu Tao, et al. Rheological properties

- 程度分析[J]. 中国塑料, 2018, 32(3):122-12
- Wang Xin, Wang Jing, Li Liyao. Feature array replication fidelity analysis of microlens on of injection molded thin-wall light guide plates[J]. China Plastics. 2018, 32(3):122-12
- [8] Fan B, Kazmer D O, Bushko W C, et al. Birefringence prediction of optical media [J]. Polym Eng Sci, 2004, 44 (4):814-824.
- [9] Lee Y B, Kwon T H, Yoon K. Numerical prediction of residual stresses and birefringence in injection/compression molded center-gated disk. Part II: Effects of processing conditions[J]. Polym Eng Sci, 2002, 42 (11):2 273-2 292.
- [10] Su Lijuan, Allen Yi Y. Finite element calculation of refractive index in optical glass undergoing viscous relaxation and analysis of the effects of cooling rate and material properties[J]. International Journal of Applied Glass Science, 2012, 3(3): 263-274.
- [11] 蒋丰泽, 刘义伦, 陈磊, 等. 工艺参数对注射压缩成型微透镜阵列基板双折射率的影响 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(8):2 610-2 616.
- Jiang Fengze, Liu Yilun, Chen Lei, et al. Effects of compression parameters on birefringence of injection compression molded microlens array substrate[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(8):2 610-2 616.
- [12] 刘水星, 庄俭, 杨于光, 等. 聚碳酸酯在高注射速度下成型超薄导光板的仿真试验分析 [J]. 中国塑料, 2015, 29(11):78-82.
- Liu Shuixing, Zhuang Jian, Yang Yuguang et al. Simulation analysis of thin-walled light guide plates of polycarbonate at high injection speed[J]. China Plastics, 2015, 29(11):78-82.
- [13] 陈宇宏, 袁渊, 李曦, 等. 注射成型和注射压缩成型角窗的残余应力比较 [J]. 航空材料学报, 2010, 30(3):48-54.
- Chen Yuhong, Yuan Yuan, Li Xi, et al. Residual stress of injection molded and injection compression molded autoglazing[J]. Journal of Aeronautical Materials. 2010, 30(3):48-54.
- [14] 孙磊磊, 蒋炳炎, 陈磊, 等. 微透镜阵列注射压缩成型的残余应力 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2017, 48(10):2 635-2 640.
- Sun Leilei, Jiang Bingyan, Chen Lei, et al. Residual force of microlens array by injection compression molding[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2017, 48(10):2 635-2 640.
- [15] 王韬, 葛勇, 郎建林, 等. 注射压缩成型与常规注射成型的模腔压力对比分析 [J]. 材料工程, 2018, 46(4): 127-133.
- Wang Tao, Ge Yong, Lang Jianlin, et al. Comparison and analysis on cavity pressure of conventional injection molding and injection compression molding[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(4):127-133.
-
- (上接第 50 页)
- of HDPE and LDPE at the low-frequency range under supercritical CO₂[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2017, 123:67-75.
- [7] Lan Hung-Yu, Tseng Hsieng-Cheng. Study on the rheological behavior of PP / supercritical CO₂ mixture[J]. Journal of Polymer Research, 2002, 9(3):157-162.
- [8] Lee M, Park C B, Tzoganakis C. Measurements and modeling of PS / supercritical CO₂, solution viscosities[J]. Polymer Engineering & Science, 1999, 39(1):99-109.
- [9] Lee M, Tzoganakis C, Park C B. On-line measurement of PS / CO₂ solution viscosities[J]. Annual Technical Conference-ANTEC, Conference Proceedings, Materials, 1997, 2:1 991-1 995.
- [10] Royer J R, Gay Y J, Desimone J M, et al. High-pressure rheology of polystyrene melts plasticized with CO₂: experimental measurement and predictive scaling relationships[J]. Polym.Sci.B 38 (2000):3 168-3 180.
- [11] Royer J R, DeSimone J M, Khan S A. High - pressure rheology and viscoelastic scaling predictions of polymer melts containing liquid and supercritical carbon dioxide[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2001, 39(23):3 055-3 066.
- [12] 王文凌, 黄兴元, 王都阳, 等. 一种测量超临界 CO₂ 在聚合物中溶解行为的新装置 [J]. 中国塑料, 2019, 33(2):97-102.
- Wang Wenling, Huang Xingyuan, Wang duyang, et al. A new measuring device for solubility of supercritical carbon dioxide in polymers[J]. China Plastics, 2019, 33(2):97-102.
- [13] 梁基照. 聚合物材料加工流变学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- Liang Jizhao. Polymer material processing rheology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [14] Han Chang Dae. Rheology in polymer processing[M]. New York: Academic Press, 1976:89-109.