

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.07.010

PS/超临界CO₂挤出过程中泡孔结构演变的群体平衡模拟

刘景曼¹, 严水霖¹, 宗原¹, 许志美¹, 刘涛¹, 赵玲^{1,2}

(1. 华东理工大学化学工程联合国家重点实验室, 上海 200237; 2. 新疆大学化学化工学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 为准确预测聚合物的泡孔结构并指导工业中发泡产品的性能调控和工艺优化, 通过引入群体平衡方程(PBE), 并耦合聚苯乙烯(PS)熔体流动方程及熔体相与气泡相中CO₂传质机理, 建立了挤出口模中PS/超临界CO₂体系发泡过程数值模型, 用于描述气泡群体的成核和生长行为。基于此模型计算, 揭示了挤出口模中气泡的成核和生长行为, 探明了挤出口模中泡孔结构的演变规律, 并发现泡孔形成与流动特征及CO₂饱和溶解度密切相关。根据气泡生长规律, 可将口模内泡孔密度的演变分为四个阶段, 工业上应控制气泡处于相应的生长阶段以得到期望的泡孔结构。

关键词: 超临界二氧化碳; 挤出发泡; 数值模拟; 群体平衡方程; 泡孔结构

中图分类号: TQ021.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)07-0054-06

Population Balance Simulation for Evolution of Cell Structure during Extrusion Foaming of PS / Supercritical CO₂

Liu Jingman¹, Yan Shuilin¹, Zong Yuan¹, Xu Zhimei¹, Liu Tao¹, Zhao Ling^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. School of Chemistry & Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract : To accurately predict the cell structure of polymer materials and guide the foaming product performance control and process optimization in industry, by introducing the population balance equation (PBE), coupled with the flow equation of polystyrene (PS) melt and the mass transfer mechanism of CO₂ between melt phase and bubble phase, the numerical model for the foaming process of PS / supercritical CO₂ system in an extrusion die was established to simulate the nucleation and growth of bubble population. Based on the simulation, the nucleation and growth behaviors of bubbles in the extrusion die were clarified, and the evolution laws of the cell structure in the extrusion die were revealed. It is found that the formation of bubbles is closely related to the flow characteristics and CO₂ saturation solubility. According to the law of bubble growth, the evolution of cell density in the die can be divided into four stages. In industry, the bubble should be controlled corresponding to the growth stage so that the desired cell structure can be obtained.

Keywords : supercritical carbon dioxide ; extrusion foaming ; numerical simulation ; population balance equation ; cell structure

在挤出发泡过程中, 聚合物与超临界CO₂的均相溶液由于通过口模时快速卸压, 使气泡核形成并生长, 最终成为具有一定泡孔结构的发泡材料。这一连续发泡过程生产效率高, 被认为是最具工业意义的聚合物泡沫材料制备方法^[1]。所制得泡沫材料的泡孔结构决定了发泡材料的性能及应用领域^[2], 而充分理解口模内泡孔结构的形成过程, 将可指导

生产过程中产品性能的调控, 因而具有重要的工业应用价值。

泡孔结构源于气泡的成核和生长, 为研究气泡成核行为, J. S. Colton 等^[3]最先将经典成核理论引入至聚合物发泡过程, 然而之后的研究表明, 该理论模型由于忽略了剪切流场中两相的相互作用, 难以对聚合物 / 气体混合体系的成核过程进行准确预

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0302200)

通讯作者: 宗原, 副研究员, 博士, 主要从事基于计算流体力学的化工反应器设计及工程化开发 E-mail : zongyuan@ecust.edu.cn

收稿日期: 2019-04-15

引用格式: 刘景曼, 严水霖, 宗原, 等. PS / 超临界CO₂挤出过程中泡孔结构演变的群体平衡模拟 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(7) : 54-59.

Liu Jingman, Yan Shuilin, Zong Yuan, et al. Population balance simulation for evolution of cell structure during extrusion foaming of PS / supercritical CO₂[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(7) : 54-59.

测。为此,研究人员修正并改进了该模型^[4-5]。其中, L. Chen 等^[6]通过用毛细管数表示气泡的形变程度,提出了剪切成核理论,用于描述剪切流场对气泡成核的影响。而气泡核形成后, CO₂ 在熔体相和气泡相间存在浓度差,该传质推动力促使 CO₂ 进入气泡核内,气泡生长过程开始,并逐渐趋于稳定。可见,该过程与传质过程密切相关,决定了泡孔最终的形态结构。

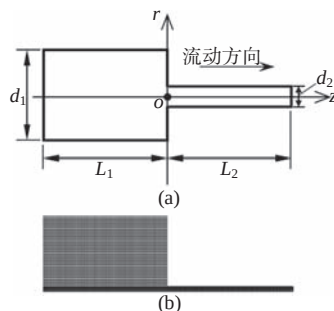
发泡行为理论研究的同时,相关的实验研究也在进行^[7-9]。K. Taki 等^[10]研究了釜式发泡中的卸压速率对气泡成核、生长及最终泡孔结构的影响。A. Gandhi 等^[11]研究了挤出发泡中螺杆转速和口模温度对气泡生长和泡孔形态转变的影响。此外,基于大量实验数据,研究者还建立了诸多描述气泡成核、生长的物理模型^[12-13],以准确描述发泡过程中气泡的行为。然而,由于气泡生长涉及的时间尺度小且传质快,仅依靠实验手段研究难度大。而基于计算流体力学的研究方法可模拟发泡过程的各个细节,进而深入了解发泡机理,由此为发泡工艺的优化提供理论指导^[14]。

笔者针对超临界 CO₂ 的连续挤出发泡过程,将双流体模型和群体平衡方程耦合建立数值模型,分别采用剪切成核理论和生长模型描述气泡成核、生长行为,模拟了气泡在口模中的发泡行为,详细探讨了泡孔结构的演变规律,并深入分析了泡孔结构的形成机理。

1 数值模型与方法

1.1 几何模型和网格划分

图 1a 所示为挤出口模的几何结构,包括导管段和发泡毛细管段。其中,导管段长度为 L_1 ,直径为 d_1 ,发泡毛细管段长度为 L_2 ,直径为 d_2 , $d_2=2R_0$, R_0 即毛细管段半径, $L_1=L_2=10$ mm。聚合物熔体自导管段流入毛细管段,流动方向即为轴向位置 z ,沿口模半径方向即为径向位置 r 。另外,定义毛细管段进口处为 $z=0$,口模轴心处为 $r=0$ 。由于聚合物熔体黏度较高,雷诺数远小于 1,故在导管段内聚合物熔体的速度分布较为均匀,压力基本保持不变,因此,导管段长度的选取对毛细管段的流动影响不大,所选取导管段的 $L_1/d_1=1.29$,发泡毛细管段 $L_2/d_2=20$ 。采用结构化网格对几何模型进行划分。由于气泡的成核和生长过程主要发生在毛细管中,为捕捉其中的流动和发泡过程,对毛细管区域进行网格加密,如图 1b 所示。



a—挤出口模的结构示意图; b—网格划分

图 1 挤出口模的结构示意图及网格划分

1.2 控制方程

根据聚合物熔体在挤出口模内的流动特征,在数值模拟计算过程中对计算模型作如下假设:

- (1) 聚合物熔体为不可压缩流体,且流动为层流;
- (2) 忽略壁面处可能出现的滑移;
- (3) 挤出过程为等温过程。

采用欧拉-欧拉两相流模型来描述聚合物/超临界 CO₂ 体系在口模中的流动行为,其控制方程如下所示。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{\mu}_s) = \dot{m}_{sb} \quad (1a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_b \rho_b) + \nabla \cdot (\alpha_b \rho_b \vec{\mu}_b) = \dot{m}_{sb} \quad (1b)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{\mu}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{\mu}_s \vec{\mu}_s) = -\alpha_s \nabla P + \nabla \cdot \sigma_s - \dot{m}_{sb} \vec{\mu}_s \quad (2a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_b \rho_b \vec{\mu}_b) + \nabla \cdot (\alpha_b \rho_b \vec{\mu}_b \vec{\mu}_b) = -\alpha_b \nabla P + \nabla \cdot \sigma_b + \dot{m}_{sb} \vec{\mu}_s \quad (2b)$$

上式中,下标 s 和 b 分别表示熔体相和 CO₂ 气泡相, α 为相分率, ρ 为密度, $\vec{\mu}$ 为速度, P 为熔体压力, σ 为表面张力, $\dot{m}_{sb}$ 为熔体相向 CO₂ 气泡相的传质速率,其值主要受气泡成核和生长的影响。

组分输运方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \alpha_s Y_i) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s Y_i \vec{\mu}_s) = -\nabla \cdot \alpha_s \vec{J}_i \quad (3)$$

上式中, Y_i 为聚合物相中所溶解的 CO₂ 的质量分数, $\vec{J}_i$ 为 CO₂ 在聚合物熔体中的扩散通量。

此外,挤出过程中气泡群体行为采用群体平衡方程 (PBE) 描述。

$$\frac{\partial}{\partial t}[n(V,t)] + \nabla \cdot [\vec{\mu} n(V,t)] + \underbrace{\nabla_v \cdot [G_v n(V,t)]}_{\text{Growth Term}} = 0 \quad (4)$$

上式中,初始条件和边界条件分别为: $n(V, t=0)=n_v$, $n(V=0, t)G_v=\dot{n}_0$;下标 v 表示以体积计算的数值, n 为数密度函数, V 为气泡体积, t 为时间, G_v 为气泡生长速率, $\dot{n}_0$ 为气泡成核速率。

1.3 数学模型

口模中气泡群体的行为采用PBE方程进行描述,其中气泡成核和生长的数学模型采用用户自定义函数加载到群体平衡模型中,同时进行耦合求解。

具体地,依据经典成核理论和M. Favelukis等^[15]的研究结果,剪切流场作用下气泡的成核方程可表示为:

$$\Delta G = \frac{4}{3} \pi R_c^2 \sigma / (3.45^3 Ca) \quad (5)$$

上式中, ΔG 为成核所需的吉布斯自由能垒, R_c 为临界气泡核半径, Ca 是毛细数,定义为 $\eta \dot{\gamma} R / \sigma$, η 为熔体黏度, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, R 为气泡半径。

气泡生长模型则基于细胞模型,在等温条件下通过耦合气泡相中动量、质量守恒方程和扩散方程进行描述,如式(6)~式(8)所示。

动量守恒方程:

$$P_b - P_s - \frac{2\sigma}{R} + 2 \int_R^\infty \frac{\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}}{r_0} dr = \frac{4\eta}{R} \left(\frac{dR}{dt} \right) \quad (6)$$

CO₂在气泡界面处的质量守恒方程:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{4\pi}{3} \frac{R^3 P_b}{R_g T} \right) = 4\pi R^2 D \frac{\partial c}{\partial r} \bigg|_{r=R} \quad (7)$$

气泡壳层内的气体扩散方程:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\dot{R} R^2}{r_0^2} \frac{\partial c}{\partial r_0} = \frac{D}{r_0^2} \frac{\partial}{\partial r_0} \left(r_0^2 \frac{\partial c}{\partial r_0} \right) \quad (8)$$

上式中, τ_{rr} 和 $\tau_{\theta\theta}$ 分别为径向应力和轴向应力, r_0 为距离气泡中心的径向距离, R_g 为气体常数, T 为热力学温度, D 为聚合物熔体中的气体扩散系数(它是发泡剂温度和浓度的函数), c 为气体浓度, $\dot{R}$ 为气泡生长速率,其值为 dR/dt 。

1.4 计算设置

采用无定形聚苯乙烯(分析纯,国药集团化学试剂公司)作为基体,CO₂作为发泡剂,口模进口压力设置为10.5 MPa,发泡温度为180℃,此状态下的CO₂处于超临界状态。此外,所建立模型中溶解度、表面张力、流变特性等物性参数的测量方法和具体数值见前期工作^[16]。

在上述建立的数学模型中,按照几何级数共设置5类不同气泡尺寸,分别为0.1,0.8,6.4,51.2,409 μm,对各尺寸气泡均进行PBE方程求解。为改善计算收敛情况,采用速度-压力耦合的Couple

算法并耦合体积分数方程同时求解。数值计算过程中连续性方程、动量方程、组分输运方程以及PBE方程均采用二阶迎风插值格式,各物理量收敛标准均设为 1×10^{-4} 。

口模的进口采用速度边界条件,出口采用压力边界条件,壁面为绝热无滑移壁面,中心轴线为轴边界,所有计算均在入口速度为 3×10^{-6} m/s,CO₂注入量为2.5%(质量分数)条件下进行。

1.5 模型验证

为验证网格无关性,在二维轴对称口模中分别考察四种网格数目对口模中熔体速度及压力的影响,网格1~4这四组网格对应的网格数目分别为62 623,130 139,222 253和376 678,计算结果如图2所示。图2中横坐标“轴向相对位置”表示轴向绝对位置点到导管入口的长度与导管和毛细管总长度的比值。由图2可知,网格数目对低雷诺数的聚合物熔体挤出流动影响较小,采用不同网格所获压力及速度的相对误差均在1%以内。同时考虑计算精度及计算量,确定采用网格2方案(即网格数目为130 139)划分计算区域。

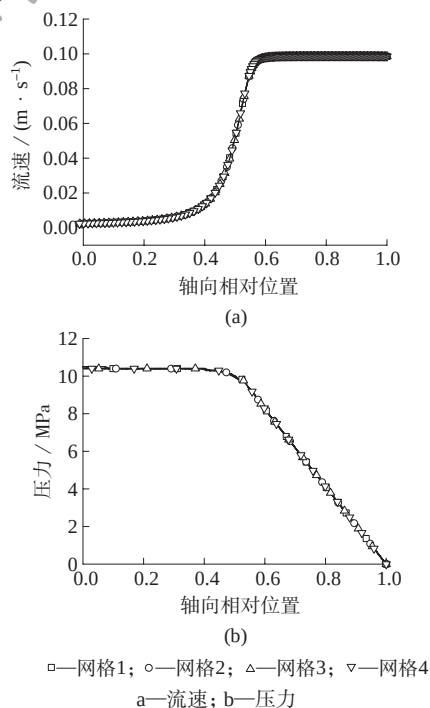


图2 不同网格数目下熔体沿流动方向的流速分布和压力分布(初始压力为10.5 MPa)

2 结果与讨论

2.1 口模内流动对剪切速率和气泡相体积分数的影响

图3为毛细管段不同轴向位置处(z/L_2)熔体

剪切速率和气泡相体积分数的径向分布。由图 3a 可知,当熔体进入毛细管段时,其剪切速率沿径向逐渐增大,在壁面处达到最大值。同时随着流动进行(即 z/L_2 增大),剪切速率在近中心区有所增大,而在近壁面区自壁面开始减小。其原因与流动状态下气泡相体积分数的非均匀分布有关,由图 3b 可以看出,临近口模出口(即 z/L_2 增大),气泡相体积分数沿口模径向方向逐渐下降,且越靠近出口,近壁区气泡相体积分数越小。说明随着熔体临近出口,由于某种原因,使得近壁区气泡相中 CO₂ 分子逐渐减少,且该作用一直持续到口模出口位置。由此推断该现象是由于熔体内气泡行为引起,从而造成熔体剪切速率发生改变。

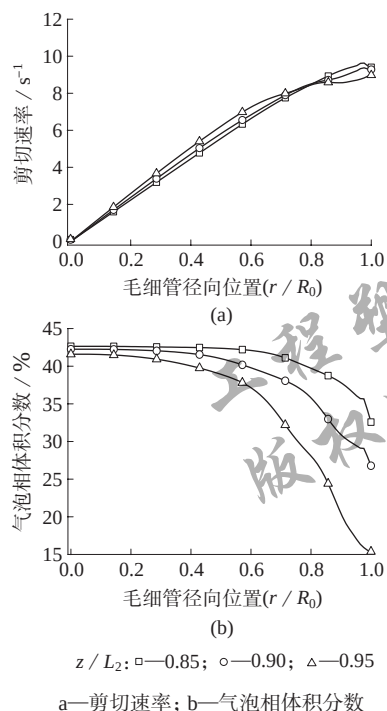


图 3 毛细管不同轴向位置处(即 z/L_2)熔体剪切速率和气泡相体积分数的径向分布

2.2 泡孔结构形成机理

(1) 成核起点。

图 4 是聚合物熔体内 CO₂ 质量分数沿口模流动分布的分布曲线。从图 4 可见,近壁面($r/R_0=0.99$)熔体中 CO₂ 质量分数在 $z/L_2=0.067$ 处开始出现下降,标志着在该位置,熔体相中 CO₂ 分子开始逸出,形成初始的气泡核。同时观测到轴心($r/R_0=0$)熔体的成核位置为 $z/L_2=0.140$ 处,晚于近壁面处的成核位置。

此近壁面优先成核的现象与剪切速率有关。气泡成核是相分离的过程,熔体内溶解的 CO₂ 受流动

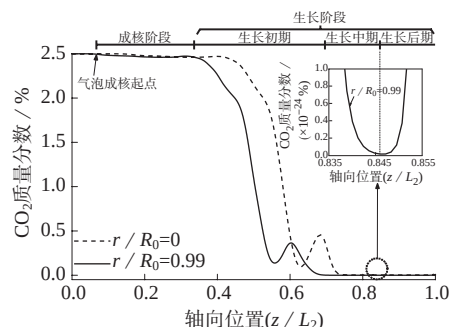


图 4 聚合物熔体内 CO₂ 质量分数沿流动方向(即 z/L_2)的分布过程压力降低的作用开始逸出,一段时间后,稳定的气泡核形成。具体地,气泡在成核时,要克服成核所需的吉布斯自由能垒,吉布斯自由能垒取决于熔体黏度、相间表面张力、剪切速率和气泡半径,如式(5)所示。因而当剪切速率增大,吉布斯自由能垒降低,气泡核更易稳定,从而自发生长。因此气泡优先在近壁面剪切力较大处成核,随后在轴心处成核。

(2) 成核和生长阶段。

与成核过程相比,气泡的生长过程是一个涉及动量、质量传递的复杂过程。根据图 4 显示的 CO₂ 质量分数沿流动方向的分布规律,以近壁面($r/R_0=0.99$)处 CO₂ 质量分数变化为基准,可将气泡行为分为成核和生长两个阶段,其中生长阶段还可细分为三个时期。

①成核阶段($z/L_2=0.067 \sim 0.335$ 处),气泡受黏度控制进行成核。

均相熔体内溶解的 CO₂ 处于热力学不稳定态,熔体在毛细管内流动时产生的流动阻力使系统压力降低,从而导致 CO₂ 的溶解度减小,部分 CO₂ 开始逸出熔体相。然而,只有当气泡克服吉布斯自由能垒,也就是气泡核的半径超过其临界尺寸时,气泡核才能够稳定存在,否则气泡核便会崩塌,聚集的 CO₂ 分子重新溶入熔体相。气泡处于成核阶段时,由于熔体内 CO₂ 浓度未达到其饱和溶解度,因而初始气泡核大多处于不稳定状态,需要经过一段时间后才能形成稳定的气泡核。

②生长初期($z/L_2=0.335 \sim 0.694$ 处),气泡受 CO₂ 扩散控制进行生长。

随着口模中系统压力的进一步下降,CO₂ 的饱和溶解度大幅降低。此时,熔体内的 CO₂ 在浓度差作用下扩散进入气泡相,使得气泡形态由泡核转变为生长的气泡,直到 CO₂ 达到新的溶解平衡,这一生长初期过程结束。在 $z/L_2=0.558$ 时,熔体内 CO₂ 质量分数的下降趋势消失,反而出现小幅增加,说明

此时 CO_2 从气泡相逆向迁移到熔体相。这可能与流动过程中熔体相中压力变化有关。当 CO_2 逐渐在气泡相中富集时,气泡相内压力随之升高,而熔体相的压力却由于流动阻力的存在逐渐降低。当前者高于后者时, CO_2 将在压力作用下逆向迁移,导致熔体相内 CO_2 浓度出现小幅上升。然而受溶解度控制,经历小幅上升后, CO_2 继续保持下降趋势,直到 $z/L_2=0.712$ 处,壁面附近聚合物熔体内 CO_2 含量极低,以 CO_2 扩散控制的气泡生长阶段结束。

③生长中期 ($z/L_2=0.694 \sim 0.847$ 处),泡孔结构稳定。

气泡经历成核和生长初期阶段, CO_2 几乎全部集中在气泡相,相间扩散传质较低,气泡生长变缓,泡孔结构趋于稳定。

④生长后期 ($z/L_2=0.847 \sim 1$ 处),气泡开始出现破碎。

随着流动临近出口, CO_2 溶解度降至最低,随后其质量分数有所上升,如图4插入的放大图所示,其原因与口模内气泡破碎有关。由于近壁面剪切作用强,气泡越大越容易破碎,从而导致大气泡数密度有所减少,而破碎后的部分 CO_2 分子会重新溶解进熔体,因此 CO_2 质量分数出现一定程度地上升。该过程一直持续到出口处,气泡的生长阶段全部结束。

2.3 泡孔结构的演变规律

(1) 轴向分布。

工业上希望得到稳定的泡孔结构,而由以上泡孔结构形成机理的分析可知,近壁区气泡数密度因受剪切影响而有波动,相比之下,轴心处气泡数密度较为稳定。因此,以下将选择轴心位置处气泡的生长情况进行详细分析。

CO_2 注入量为 2.5% (质量分数) 时,不同尺寸气泡沿口模轴向的数密度分布如图5所示。在生长初期,各尺寸气泡分别在不同的轴向位置处出现。 $0.1 \mu\text{m}$ 气泡最先在 $z/L_2=0.351$ 处出现, $0.8 \mu\text{m}$ 和 $6.4 \mu\text{m}$ 的气泡的出现位置大致相同,但 $0.8 \mu\text{m}$ 的气泡数密度增长速度明显快于 $6.4 \mu\text{m}$ 的气泡。随后,依次出现 $51.2 \mu\text{m}$ 和 $409 \mu\text{m}$ 的气泡,生长起点位置分别为 $z/L_2=0.372$ 和 $z/L_2=0.396$ 。各尺寸气泡从开始出现到 $z/L_2=0.442$ 范围内均快速增加。其中 $0.1 \mu\text{m}$ 气泡生长最快,数密度达到最大值 6.6×10^8 个/ cm^3 。生长初期气泡之所以快速生长,是因为生长初期受 CO_2 扩散控制,熔体内 CO_2 过饱和,传质推动力高。

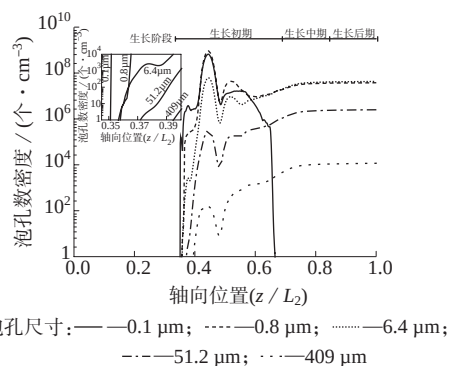


图5 不同尺寸气泡的数密度沿口模轴向分布 ($r/R_0=0$)

各尺寸气泡的数密度均在 $z/L_2=0.444$ 附近达到生长初期的峰值,随后气泡的数密度出现波动,最终达到稳定值。由2.2部分分析可知,该阶段气泡呈现动态生长过程。最初,在气泡内外压差下 CO_2 出现逆向扩散,进入聚合物熔体相。随着流动进行,扩散行为占优并最终占据主导,气泡稳定生长。但注意到,在 $z/L_2=0.675$ 处, $0.1 \mu\text{m}$ 尺寸气泡的数密度突降为0。这是由于气泡主要在生长初期阶段进行生长,而生长中期阶段气泡逐渐稳定。因此, $0.1 \mu\text{m}$ 尺寸的气泡在数密度达到峰值后逐渐生长成为较大气泡,从而导致其数密度减少至0。相应地,大尺寸气泡的数密度均有一定程度的增长,尤其是 $409 \mu\text{m}$ 尺寸的气泡,气泡生长现象最为明显,其最终的数密度高于生长初期的峰值 ($z/L_2=0.444$ 处)75倍左右。

当各尺寸气泡数密度增幅减缓、逐渐稳定时,即进入生长中期。此阶段结束后 CO_2 几乎全部集中在气泡相中,泡孔结构达到稳定。

(2) 径向分布。

图6显示了出口截面上不同尺寸气泡数密度的径向分布。此时气泡群体处于生长后期阶段,气泡开始出现破碎现象。从图6可看出, $0.1 \mu\text{m}$ 气泡主要分布在近壁面,轴心处几乎没有,而其它尺寸气泡数密度在中心区域变化不大,近壁面处有所减少。这与2.2部分生长后期阶段的分析一致,由于近壁面处剪切力作用较大,导致部分大气泡破碎。气泡破碎后的 CO_2 分子一部分用于其它气泡的生长,一部分重新溶解到熔体中,由于受熔体饱和溶解度及黏度限制,气体无法均匀溶解,而是聚集形成小气泡形式,因此导致 $0.1 \mu\text{m}$ 气泡的数密度增大。

由图6可看出,相比于口模出口截面的轴心处,近壁面处小气泡数密度更多而大气泡数密度较少,结合图3a可知,这是由近壁面处剪切力较大所致。

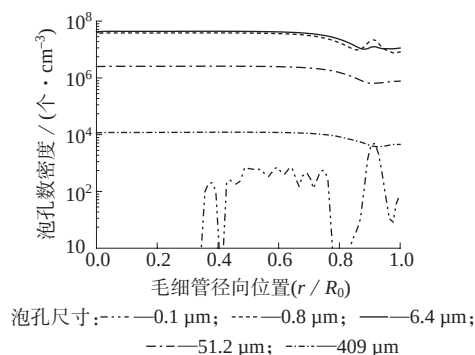


图6 出口截面上不同尺寸气泡数密度的径向分布 ($z/L_2=1.0$)

因此,增大剪切力将有利于最终得到泡孔尺寸更小的泡孔结构,由此更接近微孔发泡材料的泡孔尺寸($0.1 \sim 10 \mu\text{m}$)。而工业上为获得此微孔发泡材料,可从增大剪切力的角度出发来调节螺杆转速和黏度。一方面,增大螺杆转速可使口模内熔体流速、剪切速率增大,进而引起剪切力的增大;另一方面,鉴于聚合物熔体常为假塑性流体,减小其黏度,也可增大剪切力,但需考虑黏度增大引起的气泡成核、生长等过程的变化。

3 结论

采用双流体模型与PBE方程耦合,模拟了气泡在口模中的发泡行为,探讨了泡孔结构的演变规律,并分析了泡孔结构的形成机理。主要得到以下结论:

(1) 挤出口模中气泡的成核、生长涉及动量、质量传递过程。由于流动压降的存在,引发气泡成核;CO₂气泡呈现动态生长过程,直至口模出口。

(2) 挤出口模内气泡的演变分为以下四个阶段:受熔体黏度控制的气泡成核期;CO₂扩散引起气泡数密度快速增长的生长前期;气泡生长稳定、泡孔结构初步形成的生长中期;因壁面剪切力显著而出现气泡破碎的生长后期。根据此规律,工业上可控制气泡处于相应的生长阶段,以得到期望的泡孔结构。

(3) 受口模中流动特性及相平衡所致,气泡优先在内壁面形成,其形成源于口模内壁面较大剪切力引起的气泡优先成核与生长。

参考文献

[1] 赵正创,欧阳春发,相旭,等.微发泡聚合物材料的研究进展[J].化工进展,2016,35(S1):209-215.
Zhao Zhengchuang, Ouyang Chunfa, Xiang Xu, et al. Research progress in microcellular polymer material[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(S1):209-215.

[2] Chauvet M, Sauceau M, Fages J. Extrusion assisted by supercritical CO₂: A review on its application to biopolymers[J]. Journal of Supercritical Fluids, 2017, 120:408-420.

[3] Colton J S, Suh N P. Nucleation of microcellular foam: Theory and practice[J]. Polymer Engineering and Science, 1987, 27(7):500-503.

[4] Sun Y, Ueda Y, Suganaga H, et al. Experimental and simulation study of the physical foaming process using high-pressure CO₂[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2016, 107:733-745.

[5] Tammaro D, D'Avino G, Di Maio E, et al. Validated modeling of bubble growth, impingement and retraction to predict cell-opening in thermoplastic foaming[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 287:492-502.

[6] Chen L, Wang X, Straff R, et al. Shear stress nucleation in microcellular foaming process[J]. Polymer Engineering & Science, 2010, 42(6):1151-1158.

[7] Shaayegan V, Wang G, Park C B. Effect of foam processing parameters on bubble nucleation and growth dynamics in high-pressure foam injection molding[J]. Chemical Engineering Science, 2016, 155:27-37.

[8] Tsivintzelis I, Sanxaridou G, Pavlidou E, et al. Foaming of polymers with supercritical fluids: A thermodynamic investigation[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2016, 110:240-250.

[9] Peng X F, Liu L Y, Chen B Y, et al. A novel online visualization system for observing polymer extrusion foaming[J]. Polymer Testing, 2016, 52:225-233.

[10] Taki K, Nakayama T, Yatsuzuka T, et al. Visual observations of batch and continuous foaming processes[J]. Journal of Cellular Plastics, 2003, 39(2):155-169.

[11] Gandhi A, Bhatnagar N. Die opening-induced microstructure growth in extrusion foaming of thermoplastic sheets[J]. Journal of Polymer Engineering, 2016, 36(2):129-138.

[12] Cubeddu A, Rauh C, Ulrich V. Simulations of bubble growth and interaction in high viscous fluids using the lattice Boltzmann method[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 93:108-114.

[13] Al-Moameri H, Zhao Y, Ghoreishi R, et al. Simulation blowing agent performance, cell morphology, and cell pressure in rigid polyurethane foams[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(8):2336-2344.

[14] 陈昕,柳和生,黄兴元.微孔塑料连续挤出成型快速降压口模的数值模拟[J].工程塑料应用,2013,41(3):42-46.
Chen Xin, Liu Hesheng, Huang Xingyuan. Numerical simulation of microcellular plastic in rapid decompressive die of continuous extrusion molding[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(3):42-46.

[15] Favelukis M, Tadmor Z, Semiat R. Bubble growth in a viscous liquid in a simple shear flow[J]. AIChE Journal, 1999, 45(4):691-695.

[16] 严水霖.挤出机口模中发泡过程的群体平衡模拟[D].上海:华东理工大学,2018.
Yan Shuilin. Population balance model for foaming process in extrusion die[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2018.