

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.06.005

超临界二氧化碳制备硅酮粉改性PE-UHMW发泡材料

秦升学, 蓝文康, 张弘斌, 周海萍, 刘杰

(山东科技大学机械电子工程学院, 山东青岛 266590)

摘要: 超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)由于具有极高的分子量,其泡沫材料非常适用于超低温保温和吸油分离等领域。然而,PE-UHMW的极高熔体强度使泡孔增长困难,材料可发泡性较差。为解决该问题,利用硅酮粉改性PE-UHMW,通过超临界二氧化碳对改性前后PE-UHMW进行发泡,研究了硅酮粉含量对PE-UHMW发泡性能的影响。结果表明,添加硅酮粉后,改性PE-UHMW熔体流动性得到提高,可通过双螺杆挤出机熔融加工,材料发泡倍率、泡孔密度与泡孔均匀性显著提高,泡孔尺寸减小。当硅酮粉质量分数为4%时,改性PE-UHMW具有较好的熔体加工与发泡的综合性能。此外,研究了不同饱和压力和发泡温度对硅酮粉质量分数为4%的PE-UHMW发泡性能的影响,发现随着饱和压力的增加,泡孔密度增加,泡孔尺寸和发泡倍率减小;而随着发泡温度的升高,发泡倍率先增加后降低,泡孔密度减小,泡孔尺寸增大。当饱和压力为20.68 MPa、发泡温度为130 °C时,硅酮粉质量分数为4%的PE-UHMW泡沫的泡孔密度为 1.25×10^9 个/cm³,平均泡孔直径为9.33 μm,而纯PE-UHMW泡沫的泡孔密度为 3.54×10^6 个/cm³,平均泡孔直径为69.59 μm。硅酮粉的加入有效改善了PE-UHMW的熔体加工性能和发泡性能,有利于促进PE-UHMW在泡沫材料中的应用。

关键词: 超高分子量聚乙烯;硅酮粉;熔体加工;超临界二氧化碳;发泡

中图分类号: TQ342 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)06-0032-06

Preparation of silicone powder modified PE-UHMW foaming materials by supercritical carbon dioxide

QIN Shengxue, LAN Wenkang, ZHANG Hongbin, ZHOU Haiping, LIU Jie

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract : Ultra-high molecular weight polyethylene (PE-UHMW), with its extremely high molecular weight, makes its foam materials particularly suitable for cryogenic insulation and oil separation. However, the extremely high melt strength of PE-UHMW makes it difficult for foam cells to expand, resulting in poor foamability. To solve this problem, the silicone powder was used to modify PE-UHMW and the foaming of PE-UHMW before and after modification was done with supercritical CO₂, the effects of silicone powder content on the foaming performance of PE-UHMW were studied. The results show that with the addition of silicone powder, the melt flowability of the modified PE-UHMW is improved, which indicates that the modified PE-UHMW can be melted and processed by twin-screw extruder, the expansion ratio, cell density, and cell uniformity are significantly enhanced and the cell size is reduced. When the silicone powder content is 4 wt%, the modified PE-UHMW exhibits excellent overall melt processing and foaming performance. In addition, the effects of different saturation pressures and foaming temperatures on the foaming performance of PE-UHMW with 4 wt% silicone powder were studied. It is found that as the saturation pressure increases, the cell density increases, the cell size and expansion ratio decreases. As the foaming temperature rises, the expansion ratio first increases and then decreases, while the cell density decreases and the cell size increases. When the saturation pressure is 20.68 MPa and the foaming temperature is 130 °C, the cell density of PE-UHMW foam with 4 wt% silicone powder is 1.25×10^9 cells/cm³, and the average cell diameter is 9.33 μm, while the cell density of pure PE-UHMW foam is 3.54×10^6 cells/cm³, and the average cell diameter is 69.59 μm. The addition of silicone powder effectively improves the melt processing and foaming performance of PE-UHMW, which is beneficial to promote the application of PE-UHMW in foam materials.

Keywords : ultra-high molecular weight polyethylene ; silicone powder ; melt processing ; supercritical carbon dioxide ; foaming

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2024CXGC010217)

通信作者: 刘杰, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为聚合物加工

收稿日期: 2025-03-06

引用格式: 秦升学, 蓝文康, 张弘斌, 等. 超临界二氧化碳制备硅酮粉改性PE-UHMW发泡材料[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(6): 32-37.

QIN Shengxue, LAN Wenkang, ZHANG Hongbin, et al. Preparation of silicone powder modified PE-UHMW foaming materials by supercritical carbon dioxide[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(6): 32-37.

泡沫材料由于具有轻质、高强度和优异的热性能使其在建筑、医疗、环境治理等多个领域中得到应用^[1-3]。其中泡沫材料的基材在许多应用中扮演着至关重要的角色,直接影响到泡沫材料的性能和功能。基材的选择不仅关系到泡沫的物理和化学特性,还决定了其使用寿命、加工性能和应用效率。

超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)是一种黏均分子量在150万以上的线型聚乙烯。它具有极高的分子量,使其具有远高于低分子量聚乙烯以及其他常规工程塑料的优异性能^[4-5]。PE-UHMW低温力学性能好,其冲击强度的优良表现可延续到-269℃^[6],其泡沫材料非常适合超低温保温。PE-UHMW还具有材料密度低、疏水亲油、耐化学腐蚀等特点,这些特性使其在吸油等分离领域具有很高的应用潜力^[7-9]。

制备PE-UHMW泡沫的方法有凝胶搅拌萃取法^[10]、化学发泡法^[11]、超临界CO₂物理发泡法^[12]。其中物理发泡方法因环保性和高效性受到研究者的青睐。但是PE-UHMW材料由于分子量巨大,熔体强度极高,难以熔融加工,作为发泡基体材料的研究较少,并且纯PE-UHMW发泡存在泡孔结构不均匀、发泡倍率较低等缺点^[13]。

PE-UHMW物理发泡需要解决两个问题:一是材料熔体加工性能较差,目前由于其熔体挤出效率较低或无法挤出加工,研究者多采用模压方式制备待发泡样品,但这种方式效率低,可控性差;二是材料发泡性能较差,由于纯PE-UHMW熔体强度极高,很难获得较高的发泡倍率。因此提高PE-UHMW熔体加工性能,降低其熔体强度显得尤为重要。山东大学王桂龙教授课题组采用两种创新策略改善泡沫材料性能:一是基于PE-UHMW/高密度聚乙烯(PE-HD)共混的自增强改性技术^[14];二是通过超临界CO₂发泡结合石墨纳米片构建全向气体阻隔机制改善泡孔结构^[15]。本课题组通过硅酮粉熔融共混改善了PE-UHMW的熔体流动性^[16]。硅酮粉的主要成分为聚二甲基硅氧烷(PDMS),为非晶态聚合物,无明确熔点,可通过其独特的有机硅特性改善聚合物的加工性能、表面特性和功能性。PDMS具有高的CO₂溶解度、低的表面张力与高的CO₂渗透能力^[17],可有效提高PE-UHMW的发泡性能。笔者研究了硅酮粉对PE-UHMW超临界CO₂发泡的影响,以期改善PE-UHMW发泡性能提供借鉴。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PE-UHMW:GUR 4113,分子量350万~450万,美国Ticona公司;

硅酮粉:KJ-B01,平均粒径200 nm,分子量50万,杭州凯杰塑料科技有限公司;

CO₂气体:纯度高于99.8%,济南诚信气体有限公司。

1.2 主要仪器及设备

平行双螺杆挤出机:LSSHJ-20,上海科创橡塑机械设备有限公司;

高速混料机:GH-10,北京塑料机械厂;

平板硫化仪:ST-15YP,厦门易仕通仪器有限公司;

高压泵:ISCO 260D,美国Teledyne有限公司;

高压釜:自制;

扫描电子显微镜(SEM):JAX-8230,日本电子株式会社;

电子密度仪:ZMD-2,上海方瑞仪器有限公司;

熔体流动速率(MFR)仪:GottfertMI-4,德国高特福公司。

1.3 试样制备

分别将PE-UHMW与硅酮粉按一定配比称重,在80℃高速混料机中干燥混合后使用双螺杆挤出机进行熔融共混,挤出温度280℃,螺杆转速10 r/min,经双孔模具挤出直径约为3 mm的圆棒,并截取长度为15 mm,作为改性PE-UHMW待发泡试样。采用平板硫化仪将纯PE-UHMW在温度230℃、压力15 MPa下模压10 min,压制厚度2 mm的薄板,并裁成15 mm×2 mm×2 mm待发泡样条。根据硅酮粉质量分数0%,2%,3%,4%,5%,待发泡试样分别命名为UPE,UPE-2,UPE-3,UPE-4与UPE-5。

采用降压法进行发泡,由高压泵提供10~30 MPa的高压CO₂,通过加热圈与温控器进行温度控制。将试样放入高压釜中,通入设定压力CO₂,加热高压釜至预定温度,并保温保压40 min,然后快速泄压发泡,同时冷却定型。

1.4 测试与表征

试样密度利用阿基米德法测量。发泡倍率(R)通过公式(1)计算^[18]。

$$R = \frac{\rho_m}{\rho_f} \quad (1)$$

式中: ρ_m 与 ρ_f 分别为待发泡与已发泡试样密度。

将泡沫试样放入液氮中浸泡0.5 h,脆断后喷金,使用SEM观测断面并拍照。采用开源软件Imagepy进行图像处理,统计泡孔尺寸与数量。泡孔密度 N_c 由公式(2)计算。

$$N_c = \left(\frac{n}{A} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

式中: A 为SEM照片面积; n 为照片面积范围内泡孔数量。

PE-UHMW的MFR通过MFR仪进行测定。测试过程严格遵循GB/T 3682.1-2018标准规范,测试温度为230~250 °C,测试载荷为21.6 kg。

2 结果与讨论

2.1 硅酮粉含量对PE-UHMW发泡的影响

图1为在发泡温度为130 °C、饱和压力为13.79 MPa时不同硅酮粉含量的PE-UHMW泡沫泡孔形貌SEM照片。从图1a与图1a1可以看出,纯PE-UHMW的泡孔不均匀并且存在许多未发泡区域,随着硅酮粉含量的增加,未发泡区域消失,且泡孔分布逐渐变得均匀。图2为图1各试样发泡倍率以及从图1获得的泡孔分布数据。从图2可以看出,随着硅酮粉含量的增加,发泡倍率与泡孔密度均明显升高,平均泡孔直径则呈现下降趋势。当硅酮粉质量分数由0%增加到2%,发泡倍率由6.32急剧增大为32.98,继续增加硅酮粉含量,发泡倍率变化不大,硅酮粉质量分数为3%,4%与5%时,发泡倍率分别为31.73,32.55与33.38。

泡孔密度是评价发泡过程中气泡成核的一个重要参数^[19]。图2中泡孔密度曲线表明硅酮粉使PE-UHMW泡沫的泡孔密度明显增大,当硅酮粉质量分数由0%增加到2%,泡孔密度由 6.6×10^6 个/cm³增加到 2.45×10^7 个/cm³,因此猜测硅酮粉可能具有促进气泡成核的作用。硅酮粉质量分数为3%时泡孔密度最高,增加到 3.68×10^7 个/cm³。继续增加硅酮粉含量,泡孔密度稍有下降,硅酮粉质量分数为4%与5%时,泡孔密度均约为 3.38×10^7 个/cm³。

为了分析硅酮粉改性对PE-UHMW材料熔体流动性能的影响,分析了不同硅酮粉含量的PE-UHMW的MFR,结果见表1。由表1看出,随着硅酮粉含量增加,PE-UHMW的MFR逐渐增大,硅酮粉质量分数为4%时达到最大值,继续增加硅酮粉质量分数到5%,MFR开始下降。聚合物黏度越低,

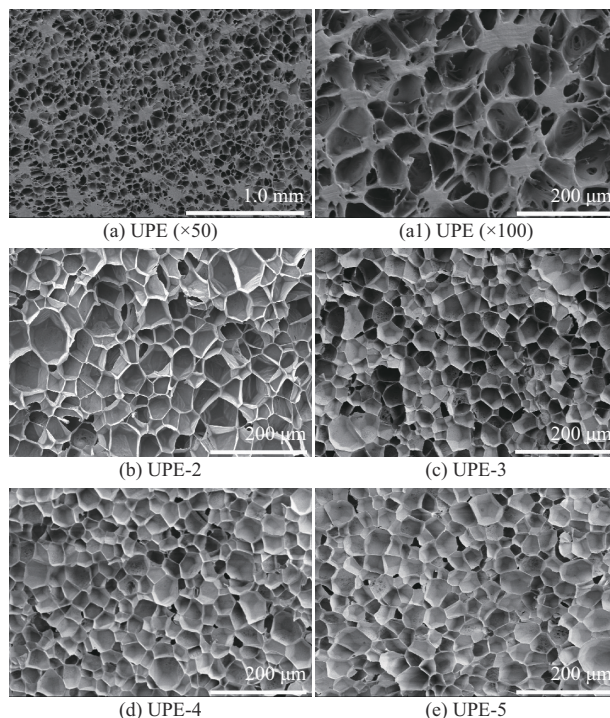


图1 发泡温度为130 °C、饱和压力为13.79 MPa时,不同硅酮粉含量的PE-UHMW泡沫的泡孔形貌

Fig. 1 Cell morphology of PE-UHMW foams with different silicone powder contents at foaming temperature of 130 °C and saturation pressure of 13.79 MPa

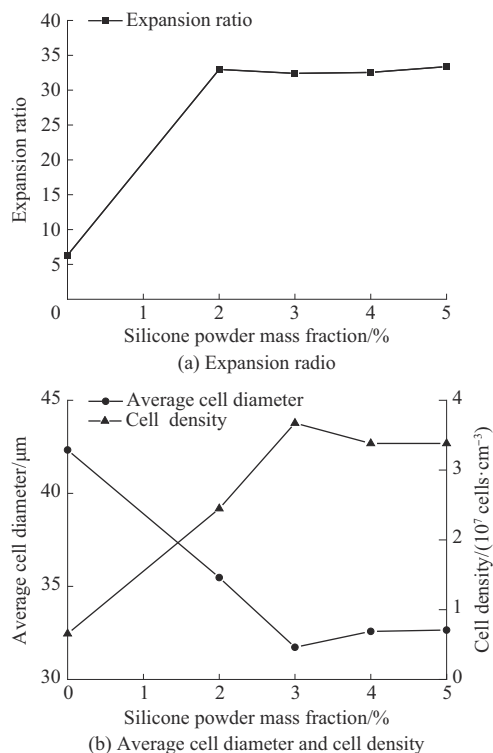


图2 不同硅酮粉含量的PE-UHMW发泡倍率、平均泡孔直径及泡孔密度

Fig. 2 Expansion ratio, average cell diameter and cell density of PE-UHMW with different silicone powder contents

MFR 越高。图 3 给出了不同硅酮粉含量的 PE-UHMW 断面 SEM 照片,可以发现随着硅酮粉含量的增加硅酮粉在 PE-UHMW 中的均匀性会变差。硅酮粉质量分数为 2% 及 3% 时,均匀性相对较好;硅酮粉质量分数为 4% 时开始出现团聚;硅酮粉质量分数为 5% 时,可以观察到明显的硅酮粉团聚现象。从图 2 可见,硅酮粉质量分数为 3%~5% 的 PE-UHMW 发泡结果差异较小。考虑到熔体加工和可发泡性能的综合表现,选择硅酮粉质量分数为 4% 的 PE-UHMW 即 UPE-4 作为发泡工艺研究的对象。

表 1 不同硅酮粉含量的 PE-UHMW 的 MFR

Tab. 1 MFR of PE-UHMW with different silicone powder contents

Silicone powder mass fraction/%	MFR/[g·(10 min) ⁻¹]		
	230 °C	240 °C	250 °C
0	0.00	0.00	0.00
2	0.23	0.33	0.38
3	0.62	0.71	0.76
4	0.87	0.90	0.92
5	0.54	0.60	0.63

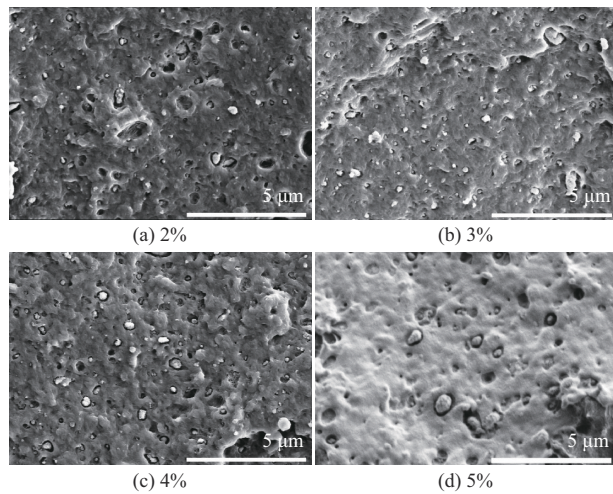


图 3 不同质量分数硅酮粉在 PE-UHMW 中的分布

Fig. 3 Distribution of silicone powder with different mass fractions in PE-UHMW

2.2 发泡条件对 PE-UHMW 发泡的影响

图 4 为发泡温度 130 °C 时,不同饱和压力下 PE-UHMW 的发泡倍率,可以看出,随着饱和压力从 6.89 MPa 升高到 27.58 MPa, UPE-4 发泡倍率从 35.7 下降到 3.6,尤其是从饱和压力 13.79 MPa 到 20.68 MPa,发泡倍率从 32.5 突降到 10。同时,当饱和压力较低时,UPE-4 的发泡倍率显著高于 UPE。图 5 为对应发泡条件下 UPE-4 泡沫的泡孔形貌,可以发现当饱和压力达到 20.68 MPa 时,泡孔形貌与 13.79 MPa 时相比,发生了剧烈的变化,泡孔数量变多,泡孔尺寸变小。泡孔密度增加造成单个泡孔内

气体减少,并且在泡孔生长过程中彼此接触,限制了泡孔长大,因而发泡倍率降低。

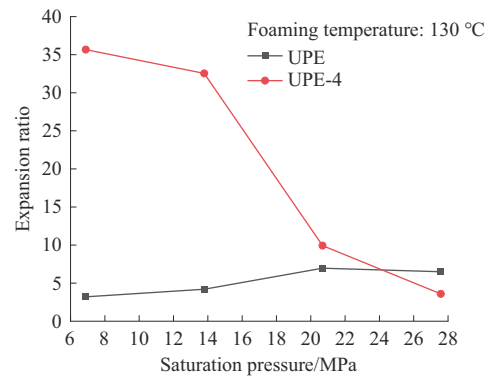


图 4 发泡温度为 130 °C 时不同饱和压力下 PE-UHMW 发泡倍率

Fig. 4 Expansion ratio of PE-UHMW under different saturation pressures at foaming temperature of 130 °C

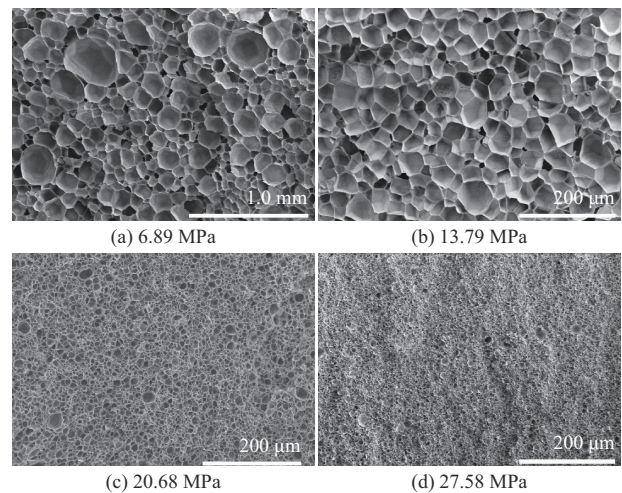


图 5 发泡温度为 130 °C 时不同饱和压力下 UPE-4 泡孔形貌

Fig. 5 Cell morphology of UPE-4 under different saturation pressures at foaming temperature of 130 °C

表 2 是根据图 5 与文献[20]获得泡孔密度与尺寸。从表 2 可知,随着饱和压力的升高,UPE-4 的泡孔密度升高,同时平均泡孔直径下降。当饱和压力从 13.79 MPa 升高到 20.68 MPa 时,变化最为明显,泡孔密度由 3.38×10^7 个/cm³ 升高到 1.25×10^9 个/cm³。同时平均泡孔直径由 32.58 μm 下降到 9.33 μm。而

表 2 发泡温度为 130 °C 时不同饱和压力下 PE-UHMW 泡沫的泡孔密度与尺寸

Tab. 2 Cell density and size of PE-UHMW foams under different saturation pressures at foaming temperature of 130 °C

Pressure/MPa	Cell density/(cells·cm ⁻³)		Average cell diameter/μm	
	UPE	UPE-4	UPE	UPE-4
6.89	5.90×10^6	1.17×10^6	44.84	96.63
13.79	6.55×10^6	3.38×10^7	42.33	32.58
20.68	3.54×10^6	1.25×10^9	69.59	9.33
27.58	1.21×10^6	6.67×10^9	98.10	5.50

饱和压力为 20.68 MPa 时, UPE 的泡孔密度仅为 3.54×10^6 个/ cm^3 , 平均泡孔直径为 $69.59 \mu\text{m}$ 。这是因为随着饱和压力增加, CO_2 在 PE-UHMW 中的溶解度提高, 成核位点增多, 泡孔密度显著增加, 泡孔尺寸减小。当饱和压力达到或高于 13.79 MPa 时, 在相同饱和压力下, UPE-4 的泡孔密度大于 UPE 的泡孔密度, UPE-4 的泡孔直径小于 UPE 的泡孔直径。表明硅酮粉引入促进异相成核, 提高了泡孔成核密度, 减小了泡孔尺寸。

图 6 为饱和压力为 13.79 MPa 时, 不同发泡温度下 PE-UHMW 的发泡倍率。从图 6 可以看出, 在恒定压力(13.79 MPa)下, UPE-4 的发泡倍率随温度升高(125 $^{\circ}\text{C}$ 至 135 $^{\circ}\text{C}$)先增后降, 最高发泡倍率提高到了 33 左右, 是纯料最高发泡倍率的 2 倍多。这是由于较高的温度提高了熔体流动性, 促进了 CO_2 的扩散和泡孔的生长。但过高的温度会使体系晶体数量减少, 泡孔成核密度降低, 虽然泡孔尺寸增大, 但由于泡孔数量减少, 造成发泡倍率下降。相对于 UPE, UPE-4 在低温区间具有更高的发泡倍率, 这是由于硅酮粉降低了熔体黏度并且增强了 CO_2 在体系中的扩散性, 促进气泡成核。

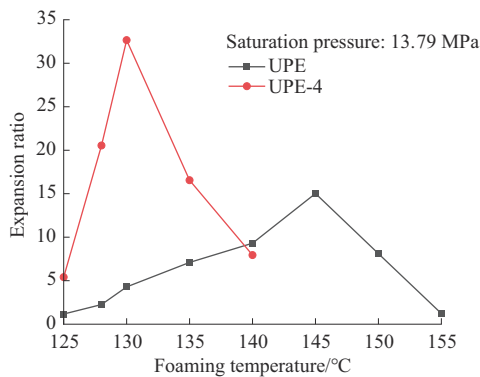


图 6 饱和压力为 13.79 MPa 时不同发泡温度的 PE-UHMW 发泡倍率
Fig. 6 Expansion ratio of PE-UHMW at different foaming temperatures under saturation pressure of 13.79 MPa

图 7 为对应发泡条件下 UPE-4 泡沫泡孔形貌, 可以发现当发泡温度达到 128 $^{\circ}\text{C}$ 时, 泡孔形貌与 125 $^{\circ}\text{C}$ 时相比, 发生了剧烈的变化, 泡孔数量减少, 泡孔尺寸变大。表 3 是根据图 6 与文献[20]获得泡孔密度与尺寸, 可以看出随着发泡温度的升高(125 $^{\circ}\text{C}$ 至 135 $^{\circ}\text{C}$), UPE-4 泡孔密度下降(6.3×10^8 个/ cm^3 至 1.7×10^7 个/ cm^3), 平均泡孔直径升高($11.69 \mu\text{m}$ 至 $40.46 \mu\text{m}$)。这是由于温度升高, 成核密度降低, 并且熔体黏度下降, 泡孔更容易长大、合并。同时可以看出, 发泡温度为 125 $^{\circ}\text{C}$ 和 128 $^{\circ}\text{C}$ 时, UPE 无法发

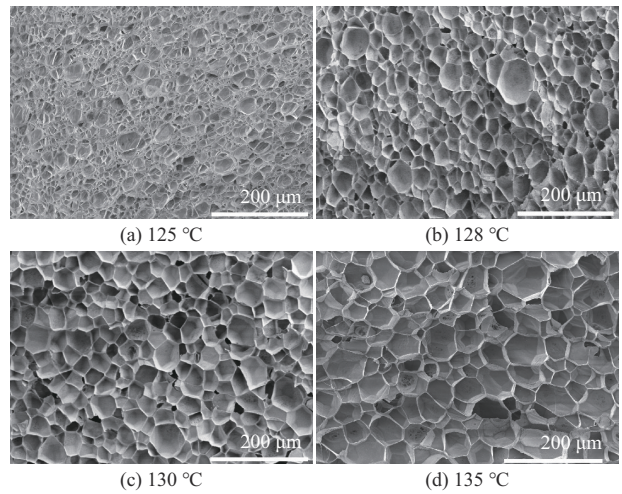


图 7 饱和压力为 13.79 MPa 时不同发泡温度的 UPE-4 泡孔形貌
Fig. 7 Cell morphology of UPE-4 at different foaming temperatures under saturation pressure of 13.79 MPa

表 3 饱和压力为 13.79 MPa 时不同发泡温度的 PE-UHMW 泡沫的泡孔密度与尺寸

Tab. 3 Cell density and size of PE-UHMW foams at different foaming temperatures under saturation pressure of 13.79 MPa

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Cell density/(cells $\cdot\text{cm}^{-3}$)		Average cell diameter/ μm	
	UPE	UPE-4	UPE	UPE-4
125	—	6.3×10^8	—	11.69
128	—	6.7×10^7	—	25.59
130	6.5×10^6	3.4×10^7	42.33	32.58
135	2.9×10^6	1.7×10^7	65.40	40.46

泡, 而当发泡温度达到或超过 130 $^{\circ}\text{C}$ 时, UPE-4 的泡孔密度高于 UPE, 泡孔尺寸低于 UPE, 表现出相对较好的发泡性能。

3 结论

(1) 硅酮粉可以作为成核剂提高 PE-UHMW 泡孔密度, 同时降低 PE-UHMW 熔体黏度, 但过量添加引发团聚, 无法有效促进成核。硅酮粉的加入还显著提高了泡孔尺寸的均匀性, 硅酮粉质量分数为 4% 的 PE-UHMW 表现出较好的熔体加工与发泡性能。

(2) 硅酮粉改性 PE-UHMW 的发泡受到发泡温度和饱和压力的影响。随着饱和压力的增加, 泡孔密度显著增加、泡孔尺寸明显减小, 但发泡倍率下降, 当饱和压力为 20.68 MPa 时, 泡孔密度达到 1.25×10^9 个/ cm^3 , 泡孔直径降至 $9.33 \mu\text{m}$ 。同时发泡温度对泡孔结构也产生明显影响, 低温(125 $^{\circ}\text{C}$)下泡孔密度较高、泡孔尺寸较小, 而高温(135 $^{\circ}\text{C}$)下泡孔密度下降、泡孔尺寸增大。

参考文献

[1] IMRAN R, AL RASHID A, KOÇ M. Material extrusion 3D print-

- ing (ME3DP) process simulations of polymeric porous scaffolds for bone tissue engineering[J]. *Materials*, 2023, 16(6). DOI: 10.3390/ma16062475.
- [2] GUAN Y H, CHENG F Q, PAN Z H. Superwetting polymeric three dimensional (3D) porous materials for oil/water separation: A review[J]. *Polymers*, 2019, 11(5). DOI:10.3390/polym11050806.
- [3] LAKATOS Á, CSONTOS M, CSÍK A. Investigation of both thermal parameters and applications of closed-cell plastic thermal insulation foams with building energetic aspects[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2024, 149(19):11 171–11 182.
- [4] XIN X C, WANG Y X, MENG Z J, et al. Improving mechanical properties and fretting wear resistance of ultra-high-molecular-weight-polyethylene via incorporation of zeolitic imidazolate frameworks-carbon nano-fiber[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021, 32(6):2 622–2 632.
- [5] WANG H Q, QUAN J Y, YU J R, et al. Enhanced wear resistance of ultra-high molecular weight polyethylene fibers by modified-graphite oxide[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(29). DOI:10.1002/app.50696.
- [6] 吴进喜, 王庆昭, 卢晓东. 超高分子量聚乙烯低温容器的制备与性能研究[J]. *工程塑料应用*, 2008, 36(12):44–47.
WU Jinxi, WANG Qingzhao, LU Xiaodong. Preparation and property study of UHMWPE cryogenic container[J]. *Engineering Plastics Application*, 2008, 36(12):44–47.
- [7] WANG X Q, WANG Y, ZHANG X D, et al. Preparation of UHMWPE/SiO₂ hybrid porous flat membranes by template and TIPS methods for enhancing their surface properties and air permeability[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 361. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.131304.
- [8] ZHANG X D, WANG X L, LIU X H, et al. Porous polyethylene bundles with enhanced hydrophobicity and pumping oil-recovery ability via skin-peeling[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(10):12 580–12 585.
- [9] SU M, PAN Y M, ZHENG G Q, et al. An ultra-light, super-hydrophobic and thermal insulation ultra-high molecular weight polyethylene foam[J]. *Polymer*, 2021, 218. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.123528.
- [10] AYDINLI B, TINÇER T. A new method for preparation of light-weight ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) foam [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1996, 59(9):1 489–1 492.
- [11] WANG G W, PENG L S, YU B, et al. Hierarchically porous sponge for oily water treatment: Facile fabrication by combination of particulate templates and thermally induced phase separation method[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018, 62:192–196.
- [12] 王博, 冯东. 超临界发泡法制备高性能热塑性高分子微/纳孔泡沫材料研究进展[J]. *化工进展*, 2021, 40(6):3 270–3 286.
WANG Bo, FENG Dong. Review of supercritical foaming high-performance micro/nano-cellular thermoplastic polymer foams[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(6):3 270–3 286.
- [13] 陈莉蓉. 超高分子量聚乙烯多孔材料的制备及性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
CHEN Lirong. Preparation and properties research of ultra-high molecular weight polyethylene microporous materials[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [14] SUN X J, WANG G L, XU Z R, et al. Microcellular foaming-derived strong ultra-high molecular weight polyethylene/high-density polyethylene foams for thermally insulating and oil-water separating applications[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(5). DOI:10.1016/j.jece.2024.113992.
- [15] SUN X J, WANG G L, XU Z R, et al. Advanced fabrication of ultra-high molecular weight polyethylene/graphite nanoplates foam for enhanced oil-water separation and thermal insulation via a novel omnidirectional gas escape barrier mechanism[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 503. DOI: 10.1016/j.cej.2024.158360.
- [16] 刘杰, 高阳, 秦升学, 等. 硅酮粉改性超高分子量聚乙烯及其熔体纺丝加工性能[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(3):28–32.
LIU Jie, GAO Yang, QIN Shengxue, et al. Silicone powder modified ultra-high molecular weight polyethylene and its melt-spinning processability[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(3):28–32.
- [17] WANG M Y, MA J, CHU R, et al. Effect of the introduction of polydimethylsiloxane on the foaming behavior of block-copolymerized polypropylene[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 123(5):2 726–2 732.
- [18] RODRIGUE D, ZHANG Z J, AÏT-KADI A. Solid state rheological properties of ultra-high molecular weight polyethylene foams [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2002, 80(6): 1 214–1 219.
- [19] NISHIKAWA S, ARIMOTO M, ERIGUCHI M. Ultrahigh-molecular polyethylene foam and process for producing the same: EP1674510B1[P]. 2004-10-08.
- [20] LIU J, QIN S X, WANG G L, et al. Batch foaming of ultra-high molecular weight polyethylene with supercritical carbon dioxide: Influence of temperature and pressure[J]. *Polymer Testing*, 2021, 93. DOI:10.1016/j.polymertesting.2020.106974.