

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.06.026

梯度聚合物泡沫材料制备方法研究进展

徐文卓, 李文晓

(同济大学航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘要: 聚合物泡沫的各项性能均随密度改变而呈规律性变化, 对泡沫材料的密度进行调控是制备梯度功能泡沫材料的重要手段。由于聚合物基体性质的不同, 需要根据基体特性和加工条件对聚合物发泡过程进行调控, 控制泡沫形态, 从而获得特定结构的梯度化泡沫。首先介绍了在气泡成核阶段, 利用诱导成核、外力场预处理和预聚体物理分散等方法制备梯度聚合物泡沫的可能性; 然后分类综述了在气泡生长阶段利用温度差、压力差和发泡气体浓度差等方法对聚合物泡沫密度进行梯度调控的研究进展。热塑性泡沫的密度梯度调控手段多针对气泡生长阶段, 在成核阶段进行异相诱导成核的效果也很明显; 而热固性泡沫的密度梯度调控手段在气泡成核阶段更有效。最后对上述方法的使用条件和效果等特点进行了归纳总结。

关键词: 聚合物泡沫; 梯度结构; 泡沫制备方法; 密度调控; 泡沫成型

中图分类号: TQ328 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)06-0176-06

Research progress in preparation methods for gradient polymer foams

XU Wenzhuo, LI Wenxiao

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract : The properties of polymer foams vary regularly with density change, and density control of the foams is an essential tool for the preparation of gradient functional foams. Due to the different properties of the polymer matrix, the polymer foaming process needs to be regulated according to the matrix properties and processing conditions to control the foam morphology so as to obtain gradient foams with specific structures. The possibility of preparing gradient polymer foams by using the methods of induced nucleation, external force field pretreatment and physical dispersion of prepolymers in the stage of bubble nucleation was firstly introduced. Then the research progress of gradient regulation of polymer foam density by using the methods of temperature difference, pressure difference and concentration difference of the foaming gas in the stage of bubble growth was categorically reviewed. The density gradient regulation means for thermoplastic foams were mostly targeted at the bubble growth stage, and the effect of heterogeneous induced nucleation at the nucleation stage was also obvious, while the density gradient regulation means for thermosetting foams were more effective at the bubble nucleation stage. Finally, the conditions of use and effectiveness of the above methods were summarized.

Keywords : polymer foam ; gradient structure ; foam preparation method ; density regulation ; foam formation

随着工业和经济建设的发展, 对材料可设计性、结构与功能一体化的要求不断提高, 传统的均匀结构材料已不能满足需要。一般来说, 材料的连续分级结构不仅比均匀结构具有更好的力学性能(抗断裂性、韧性、刚度等)^[1], 而且还能实现更高的能量吸收能力, 同时以最小的结构质量保持高强度^[2]。梯度功能材料是一种新型非均质材料, 其组织结构和

成分及性能均可按预先设定的梯度方向变化, 具有很好的应用前景和发展空间^[3]。

聚合物泡沫芯材是复合材料三明治结构使用的重要芯材之一。为了在结构和功能上提高泡沫夹层结构的性能, 对聚合物泡沫功能梯度化的需求逐渐增大。除了在泡沫中加入含量呈梯度分布的功能性粒子外, 制备密度呈梯度变化的

基金项目: 上海市空间飞行器机构重点实验室开放课题(YYHT-F805201904009)

通信作者: 李文晓, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为高分子及复合材料

收稿日期: 2024-04-07

引用格式: 徐文卓, 李文晓. 梯度聚合物泡沫材料制备方法研究进展[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(6): 176-181.

XU Wenzhuo, LI Wenxiao. Research progress in preparation methods for gradient polymer foams[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(6): 176-181.

泡沫材料是实现泡沫材料功能梯度化的更广泛和重要手段。

已有很多文献对梯度芯材结构展开研究^[4-5]。传统制备方法是首先制备不同密度的均匀发泡板,然后根据结构和功能设计的要求,在面内用胶接工艺对不同密度的泡沫板进行拼接;或进行厚度方向上的叠层胶接^[6],以提高给定方向的冲击衰减能力。但是这种处理方法形成的大量界面会严重影响结构的连续性。密度的非连续会同导致材料其他物化性能(声学、介电等)的非连续变化^[7],造成设计困难。密度可以呈连续梯度变化的高性能泡沫材料成为解决上述问题的关键途径之一。

由于聚合物基体性质的不同,需要根据基体特性和加工条件对聚合物发泡过程进行调控,控制泡沫形态^[8-9],从而获得特定结构的梯度泡沫。图1显示了常见的连续梯度泡沫的密度变化,分为中间密实(图1a)、两侧密实(图1b)、逐渐松散(图1c)、逐渐密实(图1d)。

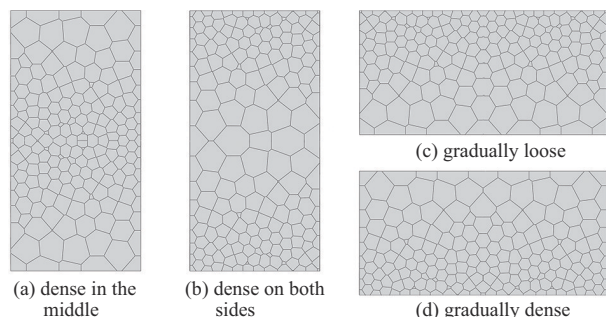


图1 常见泡沫梯度变化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of common foam gradients change

聚合物泡沫材料的成型方法可以分为两大类:通过机械力或增压方式将气体混进聚合物溶液中,再经过物理降压或化学变化固化而成的物理发泡法;在聚合物溶液添加物理/化学发泡剂,再通过高温分解或原料间的化学反应产生气体的化学发泡法。

从形成机理上讲,聚合物泡沫的形成均需经过气泡核生成、气泡膨胀、气泡固化定形3个过程^[10]。要想更好地控制泡沫中的泡孔尺寸和数量密度,了解气泡成核和膨胀阶段的机制至关重要,已有相关文献对泡沫的成核和膨胀进行数值研究^[11-14]。对此,笔者结合不同的泡沫成型工艺,分阶段对聚合物泡沫梯度化制备方法进行介绍。

1 气泡成核阶段

1.1 异相诱导成核法

气泡核的形成决定了泡沫材料的气泡分布与密度,形成大量且均匀分布的气泡核是制备致密泡沫材料的关键^[15]。在气泡成核阶段利用纳米粒子或共混聚合物的异相诱导成核效应,改变气泡核的分布状态,形成气泡核的梯度分布,便可实现泡沫材料的梯度化制备。

首先,可以通过加入纳米颗粒,有效提高非均相成核效率,使泡孔密度提高^[16-17],优化气泡核的分布。图2是未添加纳米颗粒和已添加中空分子筛(MS)纳米颗粒的聚丙烯(PP)

材料在发泡过程中的成核过程示意图,可以明显看到图2b中因为MS纳米颗粒的加入,其附近会有新增的淡黄色成核点^[18]。这是因为在发泡过程中,纳米颗粒诱导的异质气泡成核比均相成核具有更低的能量势垒,在纳米颗粒附近更易成核。在这些颗粒存在的情况下,平均泡孔直径减小,泡孔密度增加。控制纳米粒子的加入方式,采用纯PP层与PP/MS共混层共挤出的方法,可以制备具有不同密度层的泡沫。而且,通过碳纳米管、石墨烯等特殊纳米粒子的加入还可制备具有梯度介电性能、热性能等的功能梯度泡沫^[19-21]。张铁竣^[22]基于聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)/碳纳米管(CNT)微孔发泡复合吸能材料,建立了一种等密度差密度梯度泡沫模型,得到了较为系统的密度差因素对梯度泡沫吸能效能的影响规律。

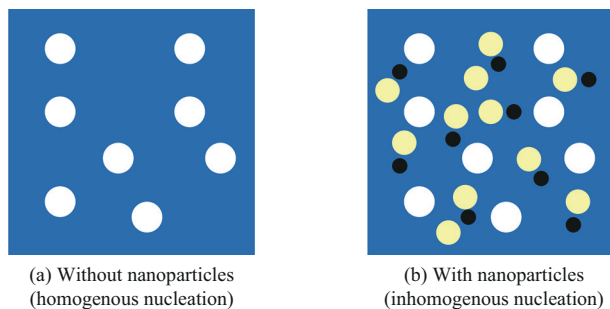


图2 添加纳米颗粒前后PP发泡过程中的成核过程

Fig. 2 Nucleation process of PP without nanoparticles or with nanoparticles during foaming

其次,通过聚合物共混,产生诱导成核效应。Bernardo等^[23]采用PMMA/热塑性聚氨酯(TPU)共混物,挤出并制备了低密度梯度纳米级泡孔的聚合物泡沫。PMMA/TPU样品从中心到边界的泡孔尺寸呈梯度分布,从均匀的纳米泡孔结构到微孔结构过渡。TPU的加入起到增强成核和减小泡孔尺寸的作用,从而产生明显的成核效应,使气泡成核密度相比未加TPU时增加3个数量级。

1.2 外力场预处理法

Chen等^[24]对可膨胀丙烯酸腈(AN)/甲基丙烯酸(MAA)共聚物进行应力增白预处理,以降低AN/MAA共聚物泡沫的泡孔尺寸。应力增白实质上是聚合物在张应力作用下,材料某些薄弱部位出现应力集中而导致在材料表面或内部出现微细凹槽或“裂纹”的现象——银纹现象。产生的银纹首先作为气泡核,在气相和聚合物相之间创造了新的界面和新的气相体积,减少了气泡成核过程中界面自由能和体积自由能的变化,提高了气泡的成核速率^[17]。银纹现象发生的相应区域中泡孔尺寸急剧减小。密度为32 kg/m³和75 kg/m³的共聚物泡沫的泡孔尺寸分别从1.07 mm和0.59 mm减少到0.37 mm和0.076 mm。但该方法成型聚合物泡沫的力学性能会因应力增白预处理产生的碎片薄膜而有所下降。

Li等^[25]分析了聚合物在振动场下泡孔形貌的变化,发现振动会影响聚合物基体中成核剂的分布。成核剂存在的位置促进了成核,提高了泡沫的密度。同时,成核位置的改变

也会使核点距离变近,使泡孔之间的孔壁厚度变薄,甚至使气泡合并。通过施加外力场,可以按需求定制发泡聚合物的密度梯度。

1.3 预聚体物理分散法

唐涛等^[26]首先按照不同配比称取聚丙烯、醇类和成核剂,制备出能够形成不同发泡密度的聚丙烯泡沫的预聚体。再通过叠加熔融模压,得到具有多层分布的聚丙烯预聚体。最后将多层颗粒或多层片材进行发泡,得到具有梯度孔结构的聚丙烯泡沫材料。

为了解决常规热固性泡沫厚板在直接热弯定型时变形程度有限的问题,尹君等^[27]采用颗粒状的聚甲基丙烯酸酯(PMI)泡沫芯材(ROHACELL®Triple F),用模具内发泡工艺制备了高性能复杂形状的夹芯泡沫。通过黏合剂,极大地改善了泡沫芯材的强度。在高密度的应用中,甚至能够达到正常工艺生产的PMI泡沫的性能。张牧原等^[28]通过水相悬浮聚合制备了可发泡PMI前驱体珠粒,有效解决了无法制备形状复杂的PMI泡沫的难题。实际上,这种方法也为制备梯度PMI泡沫打开了一条潜在的技术路线。通过这种方法,原理上只需将不同密度的可发泡PMI前驱体珠粒进行物理上的分层组合后再进行模内发泡,便可得到梯度PMI泡沫。

2 气泡膨胀阶段

气泡膨胀阶段的动力来自于气泡的内压,阻力来自于聚合物熔体的黏弹性及外部环境压强。发泡阶段的温度、环境压强以及熔体内的气体浓度都是影响泡孔形态的重要因素,也是进行梯度泡沫制造的着眼点。

2.1 温度差法

温度差法是指利用发泡温度场的温度分布控制泡沫密度分布的成型方法。例如在热压发泡工艺中,将未发泡的压制板材放在热压机上,使之在约束状态下受热发泡。若分别设置压机顶板和底板的温度,便可生产出对称(相同温度)和不对称(不同温度)结构泡沫^[29-30]。与密度均匀的聚乙烯泡沫相比,以这种方式生产的密度梯度聚乙烯泡沫具有更好的弯曲弹性模量和冲击应力缓解性能^[8]。

模具温度对泡沫密度和形貌都有显著影响^[31-33]。Rostami-Tapeh-Esmail等^[33]通过实验发现聚烯烃弹性体(POE)泡沫的密度与发泡温度场有很大关系。泡沫在恒压过程中发泡,当热压机上下板温差增大时,泡沫上下两个区域之间的泡孔结构差异就更为显著。并且泡沫顶部区域的泡孔平均尺寸从117 μm 增加到154 μm ,其增长幅度为32%。而底部区域的泡孔尺寸变化很小。在较高平均温度下,聚合物熔体中会产生更多的气体,造成密度下降的趋势。

对于注塑工艺,也可以通过改变温度变化速率形成微孔结构并赋予泡沫结构梯度^[34]。聚合物复合熔体在模具中的行进距离决定了冷却速率和气泡生长的可用时间,这是影响聚合物复合泡沫泡孔结构的主要因素^[35]。该方法形成的结构梯度不是简单的一维泡孔的尺寸变化,它在长度和厚度上都产生了梯度变化(图3),同时在靠近浇口的位置具有椭圆

形的泡孔结构,这些特殊的梯度变化使泡沫在电学和热学特性上有了很大的提升^[19]。

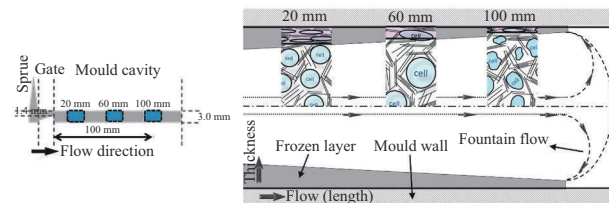


图3 成型样品距离浇口不同位置的泡孔尺寸和结构的示意图^[19]

Fig. 3 Schematic diagram of size and structure of bubble holes in molded sample at different positions from the gate^[19]

Kalia等^[36]使用单螺杆挤出机进行3D打印,将可发泡原料聚乳酸(PLA)长丝通过喷嘴挤出,以喷嘴温度和流速作为关键的打印工艺参数,发现泡沫密度随喷嘴温度升高、流速降低而逐渐变小。在保证预测准确性的前提下,同时变化喷嘴温度、流速时,密度变化范围可达859 kg/m^3 。通过挤出工艺形成的径向梯度多孔泡沫具有明显的鞘层和中心区域,相应力学性能具有明显的方向性^[37]。

2.2 压力差法

Elsing等^[38]发现可以通过改变用于生产液体泡沫乳化液的压力来专门控制聚苯乙烯(PS)泡沫的孔径和密度。生产泡沫乳化液的流程如图4a所示。生成乳液模板的方式主要是使用微流体技术控制分散相的单分散性,分散体可以通过喷嘴逐滴(或逐个气泡)形成^[39]。液体模板以水或气体为分散相,以苯乙烯/二乙烯基苯(DVB)混合物或苯乙烯水溶液为连续相(图4b),再聚合得到功能梯度的泡沫(图4c)。乳化液压力保持在0.18 MPa,气体压力最初设置为0.08 MPa,然后逐步提高到0.09 MPa,最后提高到0.1 MPa,得到如图4d所示的梯度泡沫,可以看到泡沫在204 μm 和235 μm 两个孔径之

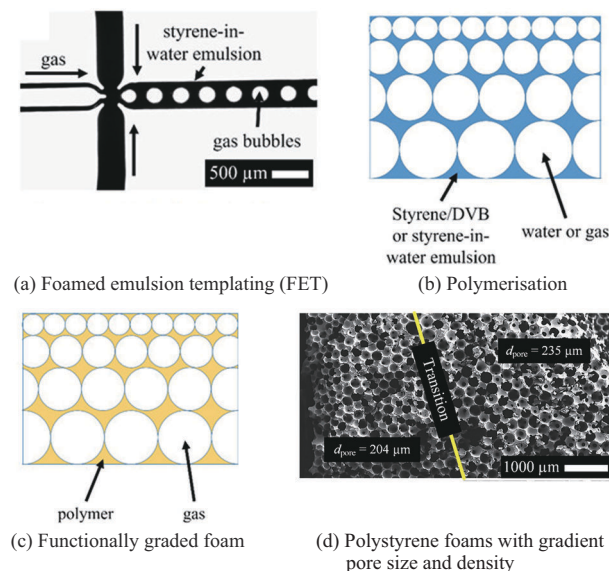


图4 通过发泡乳液模板生产功能梯度泡沫的流程^[38]

Fig. 4 Process for the production of functional gradient foams via foamed emulsion templates^[38]

间的明显过渡。但是这种方法也存在一定的界面问题,断裂容易产生在泡沫两种不同密度之间的过渡区,因此图4d只能显示两个区域的过渡。Nalin等^[40]在Elsing的基础上,在喷嘴下方加入一层薄膜,通过压力驱动,从而可以按需调整喷嘴尺寸。通过可控地增大压力,使薄膜发生变形,进而使喷嘴尺寸减小,最终能够实现液滴体积下降3个数量级的变化。

2.3 气体浓度差法

用超临界流体发泡法可以生产出具有高韧性、高冲击强度和高比刚度的致密微孔泡沫。Zhu等^[41]提出了一种利用超临界二氧化碳(ScCO_2)发泡技术的两步发泡方法,通过利用饱和时间来控制饱和TPU样品中的气体浓度分布,制备了梯度TPU泡沫。他们还开发了一种一维扩散模型来估计气体扩散系数,起到预测聚合物样品内气体浓度分布的作用。Wang等^[42]在此基础上采用一步法微孔发泡工艺制备了具有梯度泡孔形态的TPU泡沫,发现所有TPU泡沫都具有对称梯度的泡孔形态。随着饱和时间从1 min增加到8 min,边缘区域的泡孔尺寸几乎保持不变,而中心区域的泡孔尺寸首先从250 μm 增加到700 μm ,然后逐渐减小到约100 μm 。气体浓度并不一定意味着泡沫膨胀率的增加,所有制备的结构梯度TPU泡沫都具有相似的膨胀率,在6.2倍至6.6倍之间变化。

通过这种气体吸附的方法,样品在不同位置的气体浓度有所不同。在固体基体的表面上很容易进行气体浸泡,因为表面的气体浓度很高,所以基体的玻璃化转变温度(T_g)值较低,该区域就很容易产生泡沫。然而,在固体基体的中心,需要很长时间才能使样品完全饱和。气体浓度很低,所以 T_g 较高,样品在中心区域很难形成泡沫。气体浓度梯度和泡沫梯度的形成如图5所示。

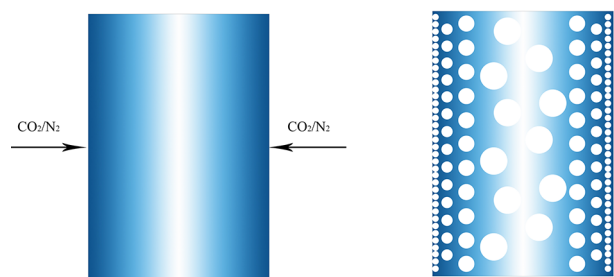


图5 气体浓度梯度和泡沫梯度的形成

Fig. 5 Formation of gas concentration gradient and foam gradient

Pinto等^[43]将低密度聚乙烯(PE-LD)板的一侧和无定形硅橡胶板(SRS)紧密接触,置于发泡模具内进行发泡。当在高温下进行发泡时,由于模具内气体的产生,模具内部压力提升,从而使SRS材料气体吸收的能力显著提升。由于无定形SRS能够吸收比熔融PE-LD更多的气体,导致熔体PE-LD边界附近的气体浓度显著降低。非均匀浓度会形成不同孔径大小的气泡,部分气泡将会收缩并消失形成固体表皮(图6)。该工艺采用气体扩散原理,可以通过待发泡聚合物的加

工参数和/或配方进行微调,从而可以控制固体表皮的厚度,而不受泡沫的最终密度和多孔结构的影响。

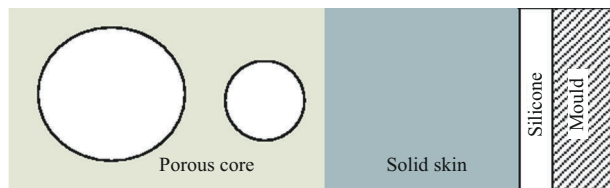


图6 气体从聚合物基体扩散到模具的有机硅覆盖层而形成外固体表皮层^[43]

Fig. 6 Formation of outer solid skin layer due to gas diffusion from polymer matrix to silicone covering layer of mould^[43]

3 聚合物泡沫梯度化方法的适用性和挑战

从发泡机理的角度,笔者归纳了在气泡成核和膨胀阶段制备梯度泡沫的研究进展,并列出相应结果,具体汇总情况见表1。由表1可知,不同的泡沫基体所适用的制备方法不同。例如聚乙烯泡沫密度受温度影响,在发泡前是预聚板,适合用压缩成型制备。从基体类型上看,热塑性泡沫的密度调控手段大多针对泡沫生长阶段;而热固性聚合物泡沫很难通过控制配方组分实现密度在液态共聚物中的分布,而且虽可通过控制发泡温度场梯度的方法,制备出具有连续密度变化的梯度泡沫,但这种泡沫容易在后期成型复合材料夹层结构的高温过程中,因初次欠发泡材料的二次发泡现象而造成芯材扭曲变形,构件成型失败。因此,对作为夹层结构芯材的泡沫塑料,更适合针对泡沫成核阶段进行调控,通过施加外力场预处理法^[24]或采用物理手段实现气泡核的非均匀分布。

另外,即使使用相同基体和方法,如果平均温度、气体饱和时间等工艺因素不同,也会导致较大的结果差异。根据泡沫基体特性,研究调控密度的方法,并基于这些规律建立统计模型,有助于实现对梯度泡沫结构的调控。

从加工方法的角度,笔者归纳了现有各类常见发泡技术可实现的梯度结构类型,详见表2。目前对微观结构的控制,包括对孔隙率和泡孔尺寸、梯度分布和孔隙互连性(开孔或闭孔或混合)的控制,是各类方法继续发展所面临的主要挑战。要理解这些加工、结构和性能之间的关系,需要多学科方法结合,包括制备聚合物泡沫技术,功能梯度聚合物泡沫微观结构形成背后的物理热力学和化学动力学,以及过程模拟和计算机建模。

从应用的角度,具有梯度结构的泡沫在声学、防爆和生物医学领域都具有重要意义。在声学领域,相比于均匀的泡沫结构,合理的梯度结构能够有效地提高材料的吸声性能^[45]。Lewińska等^[46]发现在泡沫中引入梯度结构能进一步增强噪声的控制性能,可以有效地扩大频率衰减范围,特别是对于提高低频吸声有很大的帮助。在防爆领域,具有梯度泡沫芯的三明治结构芯材的径向挠度比传统芯材减少了约60%,这意味着具有梯度泡沫芯的三明治结构芯材在抗爆性方面表现更好^[47],并且沿负载方向相对密度降低的分级设计

表 1 制备聚合物梯度泡沫的不同方法及结果
Tab. 1 Different methods and results for preparation of polymer gradient foams

Stage	Preparation mechanism	Methods	First author	Foam	Cell size	gradient form
Bubble nucleation	Heterophase-induced nucleation	PMMA/TPU blending	Bernardo ^[23]	PMMA	Nano-micron transition	Boundary cells become larger
	External force field	Stress whitening	Chen ^[24]	AN/MAA copolymer foam	76~590 μm	Smaller cell in tensile region
	Physical dispersion of prepolymers	PMI precursor beads	Zhang ^[28]	PMI	Customizable	Customizable
Bubble growth	Temperature difference	Compression molding	Barzegari ^[31]	Medium density polyethylene	47~70 μm	Single gradient change
			Rostami-Tapeh-Esmacil ^[33]	POE	104~154 μm	
		Injection molding	Hamidinejad ^[19]	High density polyethylene	3~84 μm	Both cell size and morphology change
	Gas concentration difference	Material extrusion additive manufacturing	Kalia ^[36]	PLA	57~68 μm	Varies according to nozzle temperature and flow rate
		Dual material in-mould foaming	Zhu ^[41]	TPU	30~400 μm	Boundary cells become smaller
			Wang ^[42]		30~700 μm	
	Pressure difference	Liquid templates	Pinto ^[43]	PE-LD	With solid epidermal layer	Single gradient change
			Elsing ^[38]	PS	204~235 μm	Single gradient change

表 2 常见发泡技术可实现的梯度结构类型以及面临的挑战
Tab. 2 Types of achievable gradient structures of common foaming technologies and challenges

Items	Common foaming technologies				
	In-mold foaming	Additive process	Templating	Thermoforming	Injection molding
Achievable gradient structure	Determined by prepolymer arrangement	Layer-by-layer deposition	Determined by pressure	Single gradient change	Both cell size and morphology change
Challenges	Skin-core effects giving solid; thick skins; role of interfacial and surface effects	Issues with delamination and interlayer interfaces	Low productivity; transition in cell size ^[44]	Singularity of geometry and gradient variation	Process temperature window

比相对密度增加的设计具有更好的性能^[48]。在生物医学中,多孔股骨柄呈现梯度密度变化时,可以最大限度地减少应力遮挡,同时保持必要的承载能力^[49]。医用多孔聚醚醚酮(PEEK)材料部件作为生物植入的替代材料,其孔隙率和孔径逐渐向内部增大,具有类似于人骨的微观结构,能够实现与细胞外介质的价键偶联,促进细胞粘附和再生^[50]。此外,仿生学应用于梯度泡沫可以帮助生产用于特定应用的多功能产品,例如制备基于羊角角芯的梯度结构头盔等保护性泡沫外壳,或参考竹子内部的结构制备纤维增强或聚合物共混的功能梯度聚合物泡沫^[44]。还可以进一步探索用于制造功能梯度聚合物泡沫的生物衍生聚合物,而不是基于化工的衍生聚合物,从而改善生物相容性和生物降解性。

4 结语与展望

根据树脂基体特性和加工条件对聚合物发泡过程进行调控,控制泡沫形态,从而获得所需的密度分布是制备聚合物梯度泡沫的重要手段之一。笔者综述了热塑性和热固性泡沫塑料的梯度化制备方法,对其进行了总结并展望了未来发展方向,如下。

(1)热塑性泡沫的密度梯度调控手段多针对气泡生长阶段,可分为温度差法、气体浓度差法和压力差法等3大类。

在成核阶段进行异相诱导成核的效果也很明显。

(2)针对气泡成核阶段的热固性泡沫密度梯度调控手段更有效,如异相诱导成核法、外力场预处理法和预聚体物理分散法。

(3)梯度聚合物泡沫在技术和工艺方面取得了重要进展,对工艺的进一步理解和控制还需要结合梯度聚合物泡沫微观结构形成背后的物理热力学和化学动力学,以及过程模拟和计算机建模。

(4)梯度聚合物泡沫在声学、防爆和生物医学领域都具有重要应用意义,还可以进一步探索用于制造功能梯度聚合物泡沫的生物衍生聚合物,从而改善生物相容性和降解性。

参考文献

- [1] SMEETS M, et al. ACS Applied Polymer Materials, 2023, 5(4): 2 840–2 851.
- [2] RAHMAN O, et al. Advanced Engineering Materials, 2022, 24(1). DOI:10.1002/adem.202100646.
- [3] TROFA M, et al. Chemical Engineering Journal, 2019, 362: 812–817.
- [4] 郑秋杰,等.兵工学报,2021,42(6):1 275–1 282. ZHENG Qiujie, et al. Acta Armamentarii, 2021, 42(6):1 275–1 282.
- [5] 郭军,等.振动与冲击,2023,42(22):112–120.

- GUO Jun, et al. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(22): 112–120.
- [6] 周天宇. 近场/接触爆炸载荷下PVC泡沫夹芯结构动态响应和失效机理研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2021.
- ZHOU Tianyu. Research on dynamic response and failure mechanism of PVC foam sandwich structures under near-field and contact blast loadings[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [7] WANG C H, et al. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2021, 28(1):478–488.
- [8] CUSSON E, et al. *Cellular Polymers*, 2019, 38(1–2):3–14.
- [9] 黄朋科. 超临界二氧化碳挤出发泡制备聚丙烯泡沫材料及其结构与性能研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2022.
- HUANG Pengke. Study on the Structures and Properties of Polypropylene Foams via Supercritical CO₂ Extrusion Foaming[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [10] GIBSON L J, et al. *Cellular solids: Structure and properties*[M]. Cambridge:Cambridge University Press, 1997.
- [11] GE Y K, et al. *Chemical Engineering Science*, 2022, 250. DOI: 10.1016/j.ces.2021.117415.
- [12] AZIMI H. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2023, 36(11):4 284–4 295.
- [13] YANG J K, et al. *Materials & Design*, 2021, 203. DOI:10.1016/j.matdes.2021.109577.
- [14] AZIMI H, et al. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2022, 39(8):2 252–2 262.
- [15] DONG M Y, et al. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2023, 6(6). DOI:10.1007/s42114-023-00790-6.
- [16] OZKUTLU M, et al. *Journal of Polymer Research*, 2021, 28(6). DOI:10.1002/app.48368.
- [17] AZDAST T, et al. *Journal of Cellular Plastics*, 2021, 57(5): 769–797.
- [18] YANG C G, et al. *RSC Advances*, 2018, 8(36):20 061–20 067.
- [19] HAMIDINEJAD M, et al. *Carbon*, 2022, 187:153–164.
- [20] CHEN D, et al. *Thin-Walled Structures*, 2022, 179. DOI:10.1016/j.tws.2022.109501.
- [21] TAN X M, et al. *Cellular Polymers*, 2022, 42(1):25–51.
- [22] 张铁竣, 等. *中国塑料*, 2021, 35(5):32–39.
- ZHANG Yijun, et al. *China Plastics*, 2021, 35(5):32–39.
- [23] BERNARDO V, et al. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2020, 305(1). DOI:10.1002/mame.201900428.
- [24] CHEN T, et al. *Polymer-plastics Technology and Engineering*, 2009, 48(9):897–904.
- [25] LI B, et al. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 670-671: 309–312.
- [26] 唐涛, 等. CN108164831B[P]. 2018-06-15.
- TANG Tao, et al. CN108164831B[P]. 2018-06-15.
- [27] 尹君, 等. *航空制造技术*, 2014(15):128–129.
- YIN Jun, et al. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014(15): 128–129.
- [28] 张牧原, 等. *高分子材料科学与工程*, 2023, 39(9):9–18.
- ZHANG Muyuan, et al. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2023, 39(9):9–18.
- [29] ZHANG T, et al. *Polymers*, 2021, 13(4). DOI: 10.3390/polym13040656.
- [30] CHEN Y C, et al. *Advanced Engineering Materials*, 2022, 24(3). DOI:10.1002/adem.202101124.
- [31] BARZEGARI M R, et al. *Cellular Polymers*, 2009, 28(4): 237–248.
- [32] ROSTAMI-TAPEH-ESMAEIL E, et al. *Cellular Polymers*, 2024. DOI:10.1177/02624893241241680.
- [33] ROSTAMI-TAPEH-ESMAEIL E, et al. *Polymers*, 2022, 14(19). DOI:10.3390/polym14194124.
- [34] HAMIDINEJAD M, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(44):41 726–41 735.
- [35] TIAN S, et al. *Cellular Polymers*, 2019, 38(5-6):131–152.
- [36] KALIA K, et al. *Additive Manufacturing*, 2024, 79. DOI:10.1016/j.addma.2023.103945.
- [37] HUANG P K, et al. *Journal of CO₂ Utilization*, 2022, 60. DOI: 10.1016/j.jcou.2022.101995.
- [38] ELSING J, et al. *Advanced Engineering Materials*, 2017, 19(8). DOI:10.1002/adem.201700195.
- [39] ROSEN N, et al. *Polymer*, 2023, 276. DOI: 10.1002/adem.201700195.
- [40] NALIN F, et al. *Lab Chip*, 2024, 24:113–126.
- [41] ZHU L J, et al. *Materials & Design*, 2023, 234. DOI:10.1016/j.matdes.2023.112325.
- [42] WANG G L, et al. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2022, 188. DOI:10.1016/j.supflu.2022.105667.
- [43] PINTO J, et al. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2020, 22(3):822–832.
- [44] SUETHAO S, et al. *Materials*, 2020, 13(18). DOI: 10.3390/ma13184060.
- [45] FENG Y W, et al. *Materials & Design*, 2020, 193. DOI:10.1016/j.matdes.2020.108870.
- [46] LEWIŃSKA M A, et al. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 483. DOI:10.1016/j.jsv.2020.115472.
- [47] LIN H, et al. *Journal of Cellular Plastics*, 2019, 55(6):589–613.
- [48] SUN G Y, et al. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 135. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2019.103327.
- [49] PAIS A, et al. *Bioengineering*, 2023, 10(5). DOI:10.3390/bioengineering10050515.
- [50] LI N, et al. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2024, 31(2):493–500.