

· 综述 ·

## 超临界流体发泡聚乳酸技术研究及应用进展

李 赫 刘佳薇 王 炜 于 浩\*

(联想控股前瞻技术研究院 北京 100190)

**摘要:** 聚乳酸作为最具产业化潜力的生物基可降解聚合物,其超临界流体发泡技术已成为实现轻质化、功能化应用的关键路径。本文系统综述了近年来超临界流体(主要是超临界 CO<sub>2</sub>)发泡聚乳酸材料的研究进展,重点阐述了本体改性策略、配方复合技术以及发泡工艺革新三个核心方向。通过梳理代表性研究成果,结合当下发泡聚乳酸的应用现状,分析了当前技术瓶颈并展望了未来发展趋势,为高性能生物降解泡沫材料的开发提供理论支撑与实践指导。

**关键词:** 聚乳酸;超临界流体发泡;生物降解聚合物

## Research and Application Progress of Supercritical Fluid Foaming Poly(lactic acid) Technology

LI He, LIU Jia-wei, WANG Wei, YU Hao\*

(Innovation Center, Legend Holdings, Beijing 100190)

**Abstract:** As one of the most promising bio-based and biodegradable polymers for industrialization, supercritical fluid foaming technology using poly(lactic acid) (PLA) has emerged as a key pathway for achieving lightweight and functional applications. Recent research progress on supercritical fluid (primarily supercritical CO<sub>2</sub>, scCO<sub>2</sub>) foamed PLA materials is systematically reviewed, with focus on three core directions: bulk modification strategies, formulation compounding technologies, and foaming process innovations. By summarizing representative research findings and integrating the current application status of foamed PLA, this review analyzes the existing technical bottlenecks and outlines future development trends, providing theoretical support and practical guidance for the development of high-performance biodegradable foam materials.

**Keywords:** Poly(lactic acid); Supercritical fluid foaming; Biodegradable polymers

**引用:** 李赫,刘佳薇,王炜,于浩.超临界流体发泡聚乳酸技术研究及应用进展.高分子通报,doi:10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.25.380

**Citation:** Li, H.; Liu, J. W.; Wang, W.; Yu, H. Research and application progress of supercritical fluid foaming poly(lactic acid) technology. *Polym. Bull.* (in Chinese), doi:10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.25.380

传统石油基发泡塑料因质轻、成本低、缓冲性能优异而被广泛应用于包装、建筑、日用品等领域。然而,其不可降解性与极低的回收率导致大量废弃泡沫材料长期滞留在自然环境中,形成

严重的“白色污染”。在此背景下,全球范围内“限塑”“禁塑”政策加速推进。生物基、可生物降解的聚乳酸(poly(lactic acid), PLA)因原料可再生、终端可堆肥等优势,其发泡制品被视为最具潜力

2026-02-11 收稿,2026-03-24 录用

\* 通信联系人:于浩,E-mail: yuhao@legendholdings.com.cn

doi:10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.25.380

的石油基发泡塑料替代品之一。

PLA是一种以可再生生物质资源为原料合成的脂肪族聚酯,其主要前驱体为乳酸。工业上,乳酸通常通过玉米、木薯、甘蔗等富含淀粉或糖类的农作物经微生物发酵制得,随后通过缩聚或丙交酯开环聚合工艺转化为高分子量PLA。PLA兼具良好的物理性能与环境友好特性。在力学性能方面,PLA具有较高的拉伸强度和模量,其刚性接近传统石油基塑料如聚苯乙烯(polystyrene, PS)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(poly(ethylene terephthalate), PET),同时展现出优异的透明度和表面光泽。PLA可通过常规热塑性加工手段(如挤出、注塑、吹膜及发泡等)实现高效成型,工艺兼容性强,与现有塑料加工设备适配。PLA源自可再生生物资源,在人体内及自然环境中表现出良好的生物相容性与安全性。在工业堆肥条件下(温度58~70℃,高湿度),PLA可被微生物分泌的酶水解为乳酸,并最终分解为二氧化碳和水,实现完全生物降解,显著降低废弃塑料对生态系统的长期负荷<sup>[1~3]</sup>。

然而,PLA规模化应用仍存在多重瓶颈:材料脆性大、抗冲击性差,耐热性不足,熔体强度低导致加工窗口窄、成型易出现缺陷,且原料成本偏高、阻隔性能一般,难以全面替代传统塑料。发泡作为高效减材改性手段,可针对性破解上述痛点:通过引入泡孔结构大幅减少原料消耗、降低制品成本与重量;泡孔能有效分散应力,显著改善材料脆性,提升韧性与缓冲性能;同时优化隔热、隔音效果,拓宽其在缓冲包装、汽车轻量化部件、保温材料等领域的适用范围。发泡兼顾减材增效与性能升级,是推动PLA实用化的关键技术方向<sup>[4]</sup>。

## 1 发泡技术简介

聚合物发泡技术是通过在聚合物基体中引入

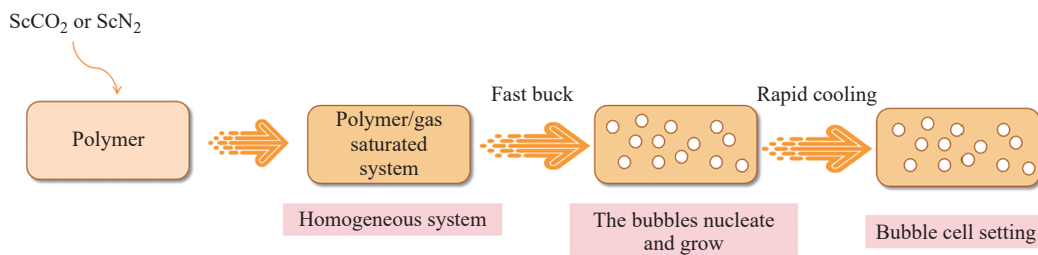


图1 超临界流体发泡过程示意图<sup>[8]</sup>(开放获取,2023 作者版权许可)

Figure 1 Schematic diagram of supercritical fluid foaming process (Reprinted with permission from Ref. [8], Copyright (2023) by the authors)

气体形成多孔结构,从而赋予材料轻质、隔热、缓冲等优异性能的重要加工方法。根据发泡原理,可分为物理发泡和化学发泡两类。物理发泡利用惰性气体(如N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>)或低沸点液体(如戊烷、氟碳化合物)汽化产生气泡;化学发泡则依赖发泡剂(如偶氮二甲酰胺(azodicarbonamide, ADC)热分解释放气体。超临界流体发泡可归为物理发泡技术,以超临界CO<sub>2</sub>或N<sub>2</sub>作为物理发泡剂,兼具高溶解度、低表面张力及环境友好特性,近年来备受关注<sup>[5,6]</sup>。

在工艺层面,常见发泡方法包括挤出发泡、注塑发泡、模压发泡及间歇式釜压发泡等,其选择取决于材料特性与制品形态需求。传统发泡技术在应用于PLA时面临显著挑战:PLA熔体强度低、结晶速率慢,易导致泡孔结构不均或塌陷。相比之下,超临界流体发泡技术可通过精确调控饱和压力和温度及泄压速率,在温和条件下实现均匀成核与稳定泡孔生长,有效规避PLA热降解风险。尤其以超临界CO<sub>2</sub>为发泡介质的PLA发泡工艺,不仅绿色环保,还能协同调控泡孔尺寸与结晶行为,已成为当发泡聚乳酸(expanded poly(lactic acid), EPLA)材料制备的前沿方向<sup>[4,7]</sup>。

## 2 超临界流体发泡聚乳酸前沿进展

超临界流体发泡是一个复杂的多阶段物理过程,涉及超临界流体在聚合物中的溶解、扩散,以及热力学不稳定驱动下的成核、生长和最终的泡孔结构固化(图1)<sup>[5,8]</sup>。

超临界CO<sub>2</sub>作为一种非极性的小分子,与PLA酯基之间存在一定的相互作用(Lewis酸碱作用),使其在PLA基体中具有相当可观的溶解度。CO<sub>2</sub>的溶入对PLA产生显著的“塑化效应”,即通过占据聚合物链间的自由体积,削弱链间相互作用力,从而大幅降低PLA的玻璃化转变温度( $T_g$ )

和熔点( $T_m$ )。该效应一方面降低了加工温度,减少了PLA在高温下的热降解风险;另一方面,增强的链段运动能力也加速了 $CO_2$ 的扩散和后续的泡孔生长。然而,过度的塑化会急剧降低熔体黏度和强度,这是导致PLA发泡窗口狭窄、泡孔结构易被破坏的核心因素之一<sup>[9,10]</sup>。

为了克服PLA在超临界发泡中的本征缺陷,近年来,全球研究者从材料的分子设计、多组分复合以及工艺的精细调控等多个层面开展了一系列研究。

### 2.1 PLA本征改性研究

针对PLA熔体强度不足,最直接有效的解决思路是对PLA分子结构进行化学改性,即本征改性。一种行之有效的方法为通过扩链反应将较短的PLA分子链延长,甚至形成轻度支化的结构,从而提高其分子量和熔体强度。Pilla等<sup>[11]</sup>研究了添加环氧功能化扩链剂、滑石粉及加工条件(如模头温度)对单螺杆挤出EPLA的微孔形态、体积膨胀率(VER)、开孔率(OCC)及结晶度的影响。研究表明,加入扩链剂后,PLA分子量提升100%,证明扩链剂具有提高PLA分子量的作用。当扩链剂添加量不超过1.0%时,添加扩链剂可形成更致密均匀的气泡结构;与此同时,VER、OCC随扩链剂添加量增加而上升,但结晶度有所降低,PLA的熔体强度得到整体提升。在该研究基础上,以Joncryl为代表的环氧功能扩链剂被广泛用于超临界流体聚乳酸发泡研究,这些研究明确表明,添加扩链剂是提升PLA发泡性能的一种高效且工业上易于实现的手段<sup>[12~16]</sup>。

然而,Joncryl并非生物基或生物可降解材料,可能对PLA的降解、回收造成障碍。设计、定义并尽可能广泛地使用生物基扩链剂具有重要意义,这既能确保材料实现完全循环利用,又能避免堆肥后潜在的微塑料形成。潜在的生物基替代物可包括:环氧腰果酚基预聚物、改性植物油(如羟基化大豆油)、绿色二元醇与二元酸等<sup>[17,18]</sup>。

此外,在PLA分子链上引入新的化学结构单元,构建非线性的拓扑结构(如支化、交联、共聚等),可以从根本上提升其熔体流变性能和结晶行为,从而拓宽发泡工艺窗口,实现对泡沫微观结构的有效调控。Wei等<sup>[19]</sup>以过氧化二异丙苯(dicumyl peroxide, DCP)作为自由基引发剂,配合交联助剂使得聚3-羟基丁酸酯(polyhydroxybutyrate, PHB)

与聚L-乳酸(PLLA)形成交联、共聚结构,研究发现改性后的可降解生物聚酯性能更优,弹性模量、黏性模量、复黏度及稳态剪切黏度均得到提升,韧性与熔体强度增加。熔体强度的提高为生物塑料的加工提供了更优的材料性能与加工方法选项,例如可适配发泡成型和热成型等工艺<sup>[19,20]</sup>。

Ikada等<sup>[21~23]</sup>在聚L-乳酸(PLLA)与聚D-乳酸(PDLA)的混合物(50/50)中发现了立构复合型聚乳酸(sc-PLA)。在sc-PLA晶体中,PLLA和PDLA分子链通过立体选择性相互作用形成紧密排列,具有更高的结晶度,表现出更好的力学强度和耐热性。Jia等<sup>[24]</sup>研究了sc-PLA对发泡过程及相应发泡产物性能的影响,发现超临界 $CO_2$ 会诱导PLLA及PLLA/PDLA共混物形成介晶结构,但不会对其中的立构复合晶产生影响。与纯PLLA相比,混入20% PDLA的共混体系会形成明显的sc-PLA立构复合晶,熔融温度提高约50℃。含有sc-PLA的体系发泡后形成的泡沫具有更高的热稳定性:110℃热处理条件下仅出现轻微的样品收缩与变形;与之相比,纯PLLA泡沫100℃收缩率便达19.25%,110℃加热条件下出现严重的泡孔结构塌陷与形状变形。Liu等<sup>[25]</sup>分别通过熔融共混法与固态发泡法制备了含有立构复合晶的PLA发泡珠粒。实验结果表明sc-PLA的存在会影响PLA的发泡行为与熔体强度,带来PLA流变性能的提升,对发泡行为的调控起到了显著作用,最终制得发泡倍率达24倍的PLA发泡珠粒;同时,sc-PLA改善了PLA发泡珠粒的粘接效果,拓宽了其热处理工艺窗口。

### 2.2 复合改性研究

除了对PLA进行本体化学改性外,通过物理共混或添加填料的方式制备PLA复合材料,是另一种经济、高效且易于工业化实施的改性路径。配方复合策略的核心思想是引入第二组分,使其在发泡过程中扮演异相成核剂、熔体增强剂或韧性改良剂的角色,从而弥补纯PLA的不足。

将PLA与其他聚合物进行熔融共混,可以利用不同聚合物的性能互补性,以较低成本实现对PLA发泡性能的综合提升。为改善PLA的柔韧性和低熔体弹性,常将其与聚己内酯(poly- $\epsilon$ -caprolactone, PCL)、聚丁二酸丁二醇酯(poly(butylene succinate), PBS)或热塑性聚氨酯(thermoplastic polyurethane, TPU)等柔性聚合物

共混。这些柔性聚合物可以在PLA基体中形成分散相,起到增韧作用,并提高整个共混体系的熔体黏弹性<sup>[26-28]</sup>。然而,共混体系的相容性是关键:不相容的体系容易在界面处发生滑移,反而可能使材料性能劣化。Gao等<sup>[29]</sup>研究了PCL与PLA的共混性能及改性策略,如果简单混合PCL与PLA,两相间存在界面相容性问题,影响熔体强度与发泡性能;通过引入了少量过氧化苯甲酰(benzoyl peroxide, BPO),利用BPO可以产生大量自由基的原理,成功改善PLA/PCL共混体系的界面相容性(图2a和2b)。与PCL/PLA共混体系相比,PCL/PLA/0.6% BPO交联薄膜的屈服拉伸强度提升41%,断裂伸长率提升632%,力学性能大幅改善,熔体强度提升(图2c和2d)。BPO诱导的交联作用与界面相容性改善,抑制了发泡过程中泡孔壁的破裂与合并,促进闭孔结构形成,形成的泡沫泡孔尺寸减小、泡孔密度增加,发泡稳定性显著提升(图2e和2f)。同时,Gao等也注意到,BPO含量超过临界值,可能导致泡孔生长不均匀,出现小泡孔(图2g和2h),因此在实际工艺中需要根据目标产品性能需求进行添加量的调整。BPO梯度添加的泡孔尺寸(图2i)和泡孔密度(图2j)测试结果也给与上述结论有力支撑。

Sun等<sup>[30]</sup>探索了PBS与PLA共混体系的发泡性能,且进一步研究了PLLA、PDLA与PBS的协同作用。研究发现单独向PLLA基体中添加PBS或PDLA,均能促进PLA的结晶生长,结晶度增加,当两者同时添加时,受sc-PLA影响,PLLA/PBS/PDLA共混物的熔体强度显著提升,但结晶度呈下降趋势,推测原因是sc-PLA的形成限制了分子链的流动性,阻碍了晶体生长,更值得注意的是PDLA改善了PLLA和PBS的相容性,降低了PBS的分散尺寸,提升体系均一性。如此一来,共混物熔体强度的提升(利于泡孔稳定生长)与结晶度的下降(提供无定型区域,促进CO<sub>2</sub>气体吸附与均相成核),共同优化了发泡结果,带来泡孔尺寸下降与泡孔密度增加。

将纳米尺寸的无机填料引入PLA基体,是实现异相成核和增强材料发泡性能的经典策略。由于纳米无机填料的高比表面积和表面能,纳米粒子在聚合物/气体体系中可以作为理想的成核点,显著降低成核能垒,从而大幅提高泡孔密度,并将泡孔尺寸减小至微米甚至亚微米级别<sup>[31-33]</sup>。Crawford

等<sup>[34]</sup>研究了扩链作用与纳米黏土掺入对PLA发泡性能的影响,采用多功能环氧苯乙烯-丙烯酸酯(Joncryl)作为扩链剂,制备了负载0 wt%~3 wt%纳米黏土的PLA样品。研究表明,扩链与纳米黏土掺入均会改变PLA的结晶行为与结晶速率:扩链通过分子缠结增强熔体强度,并延缓结晶;纳米黏土作为成核剂促进结晶,二者共同调控PLA的结晶特性。纳米黏土掺入量在一定范围内,细化泡孔,增加泡孔密度;但超过添加阈值后,纳米黏土填料发生团聚,导致泡孔塌陷,劣化发泡性能。因此,合理添加纳米无机填料,并与其他改性方法有效协同,是制备高性能EPLA的有效策略。

近年来,在“全生物基”和可持续发展的理念驱动下,使用来源于生物质的填料来改性PLA发泡材料成为研究热点。其中,纤维素纳米晶/纳米纤维(cellulose nanocrystals, CNC/ cellulose nanofibers, CNF)是从木材、棉花、细菌等来源中提取的纳米级纤维素材料,具有极高的模量、高长径比、可再生、生物相容性好等优点<sup>[35,36]</sup>。CNC/CNF面临的主要挑战是其亲水表面与疏水PLA基体之间的相容性差,以及其自身易于团聚的问题。Zhang等<sup>[37]</sup>通过Pickering乳液法制备CNC母料,CNC的亲水性使其自发吸附在油-水界面,形成稳定的乳液模板,无需对CNC进行表面疏水改性即可实现均匀分散。将该母料与PLA进行常规熔融共混,无需引入特殊工艺或助剂即可实现CNC在PLA中的良好分散,CNC负载量最高可达5 wt%,降低了工业化加工门槛。同时该配方保留了PLA与CNC的生物降解性,符合“碳中和”背景下绿色材料的发展需求,可广泛应用于包装、建筑隔热、一次性用品等领域。

### 2.3 发泡工艺优化

除了材料本身的改性,发泡工艺的创新与优化是决定最终泡沫材料结构和性能的另一大决定性因素。不同的发泡工艺适用于制备不同形态和应用场景的产品。近年来,学界及产业界研究人员不仅在传统的间歇发泡、连续挤出发泡和微孔注射成型工艺上进行了深度优化,也在积极探索新兴工艺。

釜压发泡因设备简单、参数易控,是实验室研究中最常用的方法,尤其适用于探索材料的发泡行为和机理。釜压发泡工艺的核心在于通过精确控制饱和温度、饱和压力、饱和时间以及降压速率或升温速率,来调控气体浓度、成核密度和

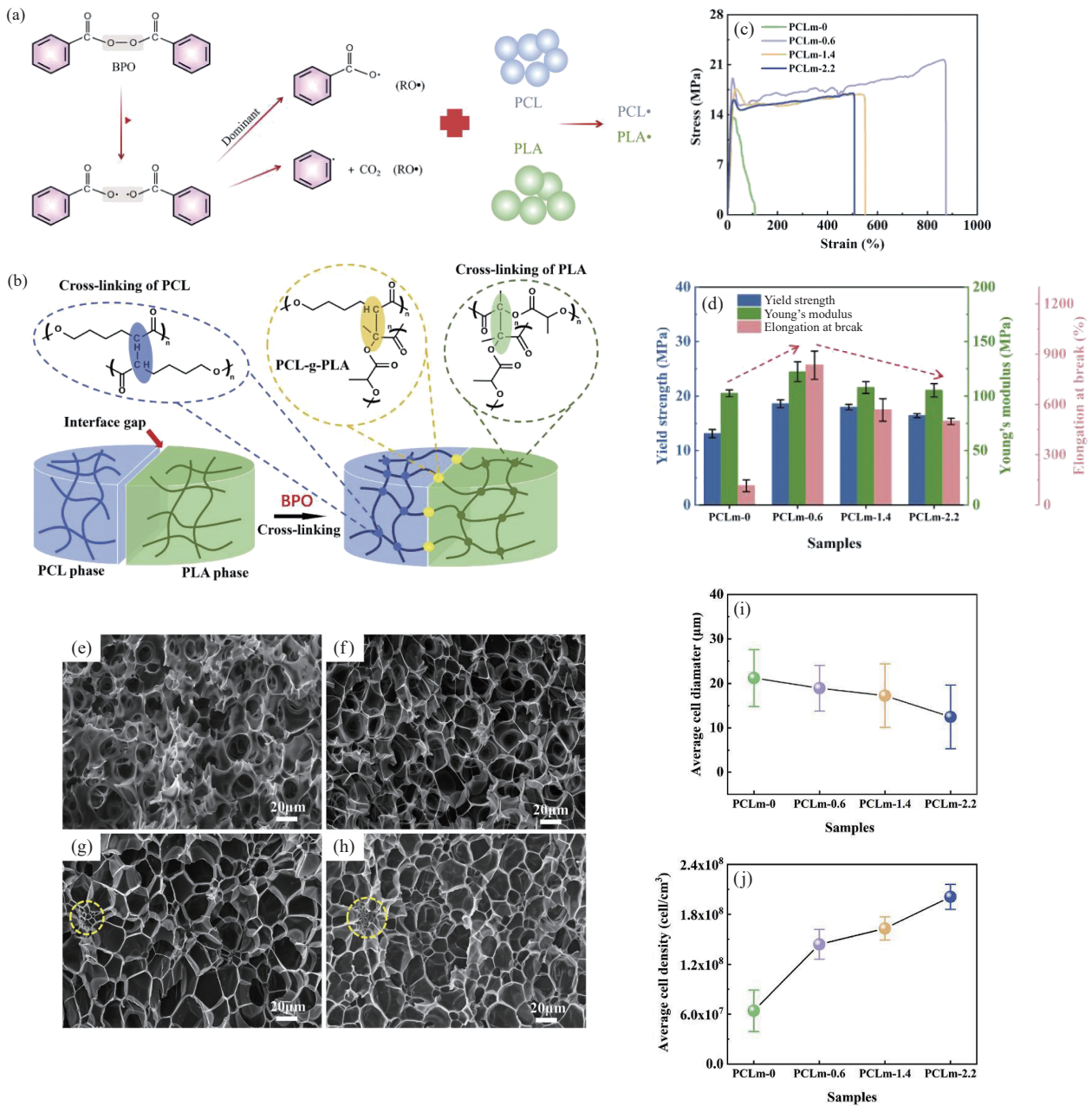


图2 (a) BPO产生自由基并与PCL、PLA相互作用示意图; (b) BPO自由基改善PCL与PLA界面相容性示意图; 不同BPO添加量(PCLm-X, 其中X代表BPO添加百分比)的聚合物(c)拉伸应力-应变曲线及(d)屈服强度、杨氏模量与断裂伸长率对比; (e) PCLm-0, (f) PCLm-0.6, (g) PCLm-1.4, (h) PCLm-2.2 经超临界CO<sub>2</sub>发泡后泡孔结构的扫描电子显微镜(SEM)图像对比; 不同含量BPO添加后发泡产物的(i)平均泡孔尺寸和(j)平均泡孔密度统计

**Figure 2** Reaction mechanism of (a) formation of RO•, PCL• and PLA•; (b) Crosslinking process of immiscible PCL/PLA blends; Mechanical properties of PCLm-X blends with different content of BPO (where X represents BPO content by percentage): (c) the tensile stress-strain curves, (d) the yield strength, Young's modulus and Elongation at break; SEM images of the foamed samples: (e) PCLm-0, (f) PCLm-0.6, (g) PCLm-1.4, (h) PCLm-2.2; Foam characterization of PCLm-X with different BPO contents: (i) average cell diameter, (j) average cell density

泡孔的生长动力学<sup>[7,38]</sup>。Li等<sup>[39]</sup>以未改性线性PLA为原料,采用改进的超临界CO<sub>2</sub>发泡策略,通过优化釜压发泡饱和压力和发泡温度,成功制备出兼具优异吸油性与隔热性的高膨胀率PLA泡

沫。通过调控饱和压力(6.9~17.2 MPa)与发泡温度(80~135 °C),实现泡孔结构(开孔/闭孔、尺寸33~630 μm、密度4.0×10<sup>4</sup>~2.4×10<sup>7</sup> cells/cm<sup>3</sup>)的精准调控,其中闭孔泡沫最大膨胀率达60倍、热导

率低至  $31.7 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 开孔泡沫最大膨胀率为 43 倍、吸油容量达  $10.9\sim 31.2 \text{ g/g}$ , 且泡孔尺寸减小可使泡沫疏水性(接触角达  $124^\circ$ )与压缩性能(强度提升 900%)得到显著优化, 该绿色制备工艺无需有毒试剂与改性剂, 为环保与节能领域提供了可持续材料解决方案。

连续挤出发泡是实现发泡材料工业化、大规模生产的核心技术。它将聚合物的熔融、超临界  $\text{CO}_2$  的注入与混合、熔体的冷却以及最终的模头挤出成型等步骤整合在一个连续的过程中<sup>[40]</sup>。在 PLA 连续挤出发泡方面, 由于其熔体强度低, 对工艺控制要求极为苛刻, 串联挤出系统(tandem extrusion line)是当前的主流技术, 它使用第一台挤出机完成熔融和混合, 第二台挤出机专门用于冷却和建

立模头压力, 实现了各功能区的解耦和独立优化。Su 等<sup>[41]</sup>指出, 若采用水下切粒, 由于 PLA 酯键对水热敏感, 易发生降解, 因此其研究团队开发了无水超临界  $\text{CO}_2$  挤出发泡结合风冷切粒技术, 用来解决 PLA 珠粒发泡规模化制备难题。样品 ExPLA-#3 具有 13 倍膨胀率、91.4% 开孔率、 $0.096 \text{ g}/\text{cm}^3$  密度及  $0.41 \text{ MPa}$  压缩模量, 可应用于绿色包装、吸音、冷链物流等领域, 适合大规模工业化量产。日本株式会社 Plasteco 的 Hayashi<sup>[42]</sup>开发了超临界发泡惰性气体定量供给装置, 通过恒定控制供给质量, 并使供给压力自适应目标压力变化, 始终保持精密的供给量, 从而实现均匀细腻的发泡成型效果(图 3a)。采用其开发的设备, EPLA 的泡孔结构、泡孔密度均得到改善, 结合不同刀头设计可以连续挤出 EPLA

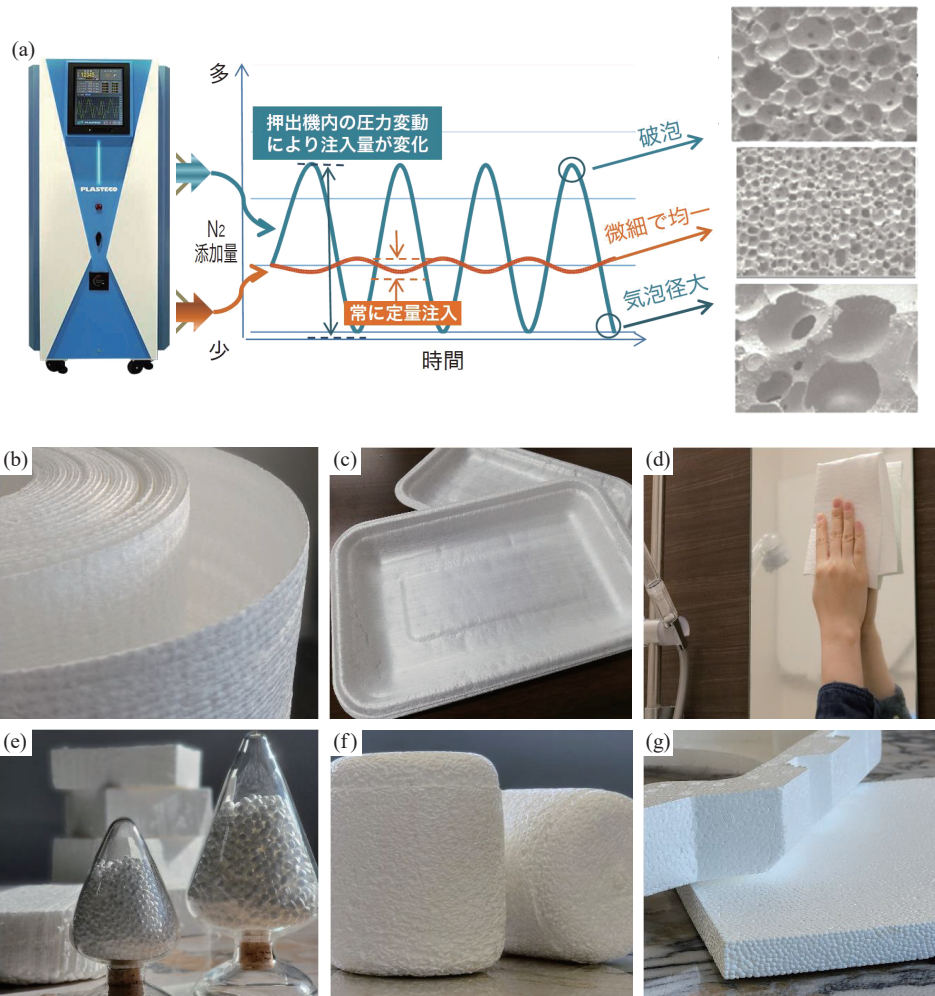


图 3 (a) Hayashi 开发连续挤出超临界流体发泡装置示意图(株式会社 Plasteco 公开信息); (b-d) EPLA 片材及应用场景示意; (e-g) EPLA 珠粒及应用场景示意

**Figure 3** (a) Schematic of the continuous extrusion supercritical fluid foaming apparatus developed by Hayashi (public website); (b-d) Schematic of foamed PLA sheets and application scenarios; (e-g) Schematic of foamed PLA beads and application scenarios

片材及珠粒,其中珠粒最高发泡倍率可达60倍,在极致轻量化场景有极大的应用潜力(图3b~3g)。

### 3 发泡聚乳酸的应用

发泡聚乳酸(EPLA)凭借其生物可降解性、低密度及良好的隔热与缓冲性能,在多个领域展现出替代传统石油基发泡材料的潜力。同时,EPLA珠粒成型可通用发泡聚苯乙烯(expanded polystyrene, EPS)/发泡聚丙烯(expanded polypropylene, EPP)的蒸汽模压设备,无需大规模改造,为其推广创造了的基础(图4a~4h)<sup>[43]</sup>。EPLA珠粒成型效果也与传统石油基发泡材料类似,可以起到环保替塑的作用(图4i和4j)。

包装领域: EPLA已用于制备缓冲衬垫、一次性餐具及热成型食品容器,有效替代EPS和EPP

制品;其闭孔结构还可实现优异的隔热性能,应用于冷链运输中的环保保温箱,满足生鲜与医药物流对温控与可持续性的双重需求。在附加值较高的电子设备缓冲包装及物流运输领域,已完成头部厂商导入验证,EPLA制品可替代传统石油基发泡材料,帮助相关企业达成全生命周期减碳目标(图4k和4l)。

建筑与保温领域: EPLA因其低导热系数和可调控的孔隙结构,被探索用于零能耗或近零能耗建筑中的墙体隔热层及室内吸音材料。尽管其耐候性和长期热稳定性仍需提升,但通过复合改性或表面处理,其在绿色建材中的应用前景日益明确<sup>[44,45]</sup>。

生物医用领域: 开孔型EPLA凭借可控的孔径分布、良好生物相容性及可降解性,被广泛研

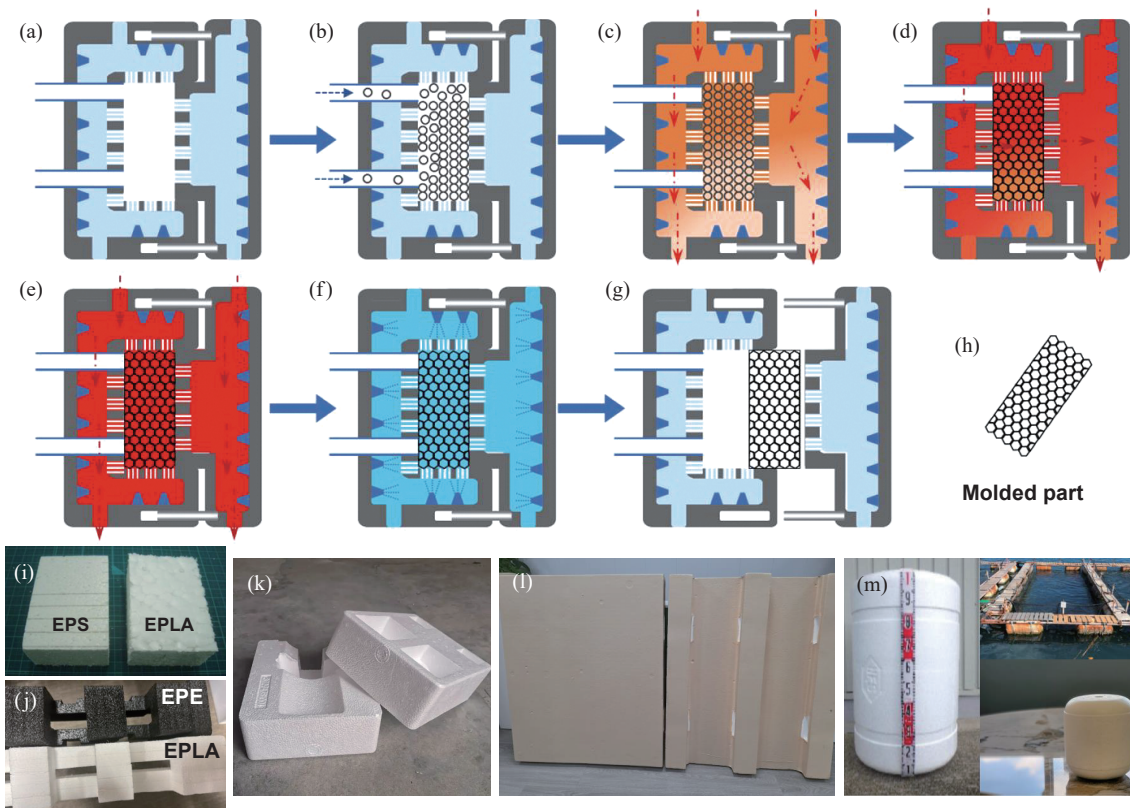


图4 (a~h)发泡珠粒蒸汽模压成型过程示意,先后步骤包括合模、填料、蒸汽加注、蒸汽穿透、保温、水冷、脱模,EPLA可通用现有成型设备、工艺<sup>[43]</sup>(开放获取,2023 作者版权许可);(i) EPLA与EPS成型效果对比;(j) EPLA与EPE(expanded polyethylene,发泡聚乙烯)成型效果对比;(k) EPLA制全降解缓冲包装;(l) EPLA制全降解航空物流栈板;(m) EPLA制全降解海洋浮球

**Figure 4** (a~h) Schematic of bead steam compression molding process, where EPLA is compatible with existing molding equipment and process (Reprinted with permission from Ref. [43], Copyright (2023) by the authors); (i) Comparison of molded EPS and EPLA; (j) Comparison of molded EPE and EPLA; (k) Biodegradable cushion packaging made from EPLA; (l) Biodegradable air logistics pallets made from EPLA; (m) Biodegradable marine buoys made from EPLA

究用于组织工程支架和药物缓释载体。其三维多孔网络有利于细胞黏附、增殖及营养传输,同时可在体内逐步降解,避免二次手术取出<sup>[46]</sup>。

此外,EPLA在其他新兴领域亦有拓展:如汽车轻量化内饰件、可降解农业育苗盘与地膜、海洋浮球、水产养殖笼箱、3D打印多孔结构材料,以及经表面功能化后用于油水分离的吸附材料等(图4m)。尽管部分应用尚处实验室或中试阶段,但随着发泡工艺优化与成本下降,EPLA有望在循环经济与低碳技术体系中发挥更广泛作用<sup>[47,48]</sup>。

## 4 总结与展望

综上所述,聚乳酸发泡技术在“双碳”目标与全球限塑政策的双重驱动下,近年来取得显著进展,已在缓冲包装、一次性餐具及冷链保温等场景实现初步产业化。随着中国PLA产量快速扩张(预计2025年将突破36万吨,中商产业研究院预测),原料供应瓶颈逐步缓解,价格将随着下游应用推广逐渐走低,为发泡制品的规模化应用奠定基础。

技术方面,发泡聚乳酸(EPLA)仍面临若干核心挑战,这些问题主要源于PLA的固有特性,包括熔体强度低、结晶速率慢以及对工艺参数的敏感性,导致泡孔结构不均匀、膨胀倍率有限及稳定性较差,制约其发展。关键在于通过分子设计、复合改性及工艺优化,系统性提升EPLA的力学性能、耐热性与泡孔结构稳定性,同时降低生产成本,拓展其在建筑保温、汽车轻量化及生物医用等高附加值领域的应用。此外,面向差异化需求开发隔热、阻燃、抗菌等多功能化EPLA材料,将成为推动其全面替代传统石油基发泡塑料的重要路径。

未来,可进一步加强高分子物理、加工工程与产业应用之间的协同创新,深化基础研究对关键技术瓶颈的支撑作用,构建“产学研用”一体化生态,以有效把握政策红利,应对标准缺失、回收体系不健全等现实挑战,加速实现生物可降解发泡材料的绿色转型与可持续发展。

## 参考文献

- 1 Gonzalez, M. F.; Ruseckaite, R. A.; Cuadrado, T. R. Structural changes of polylactic-acid (PLA) microspheres under hydrolytic degradation. *J. Appl. Polym. Sci.*, **1999**, 71(8), 1223–1230.
- 2 Zaaba, N. F.; Jaafar, M. A review on degradation mechanisms of polylactic acid: hydrolytic, photo-degradative, microbial, and enzymatic degradation. *Polym. Eng. Sci.*, **2020**, 60(9), 2061–2075.
- 3 Shalem, A.; Yehezkeli, O.; Fishman, A. Enzymatic degradation of polylactic acid (PLA). *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **2024**, 108(1), 413.
- 4 Nofar, M.; Park, C. B. Poly(lactic acid) foaming. *Prog. Polym. Sci.*, **2014**, 39(10), 1721–1741.
- 5 Di Maio, E.; Kiran, E. Foaming of polymers with supercritical fluids and perspectives on the current knowledge gaps and challenges. *J. Supercrit. Fluids*, **2018**, 134, 157–166.
- 6 Dong, M. Y.; Wang, G.; Zhang, X. N.; Tan, D. Q.; Jaya Prasanna Kumar, D.; Ren, J. N.; Colorado, H.; Hou, H.; Toktarbay, Z.; Guo, Z. H. An overview of polymer foaming assisted by supercritical fluid. *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, **2023**, 6(6), 207.
- 7 Villamil Jiménez, J. A.; Le Moigne, N.; Bénézet, J. C.; Sauceau, M.; Sescousse, R.; Fages, J. Foaming of PLA composites by supercritical fluid-assisted processes: a review. *Molecules*, **2020**, 25(15), 3408.
- 8 Zhou, Y. J.; Tian, Y. R.; Peng, X. W. Applications and challenges of supercritical foaming technology. *Polymers*, **2023**, 15(2), 402.
- 9 任倩, 黄朋科, 赵永青, 汪龙, 郑文革. 超临界流体制备聚乳酸发泡材料的研究进展. *高分子通报*, **2021**, (5), 52–64.
- 10 段续远, 郑红娟. 改性聚乳酸发泡技术研究进展. *中国塑料*, **2021**, 35(7), 134–139.
- 11 Pilla, S.; Kim, S. G.; Auer, G. K.; Gong, S. Q.; Park, C. B. Microcellular extrusion-foaming of polylactide with chain-extender. *Polym. Eng. Sci.*, **2009**, 49(8), 1653–1660.
- 12 Ludwiczak, J.; Kozłowski, M. Foaming of polylactide in the presence of chain extender. *J. Polym. Environ.*, **2015**, 23(1), 137–142.
- 13 Zhou, M.; Zhou, P.; Xiong, P.; Qian, X.; Zheng, H. H. Crystallization, rheology and foam morphology of branched PLA prepared by novel type of chain extender. *Macromol. Res.*, **2015**, 23(3), 231–236.
- 14 Karkhanis, S. S.; Matuana, L. M. Extrusion blown films of poly(lactic acid) chain-extended with food grade multifunctional epoxies. *Polym. Eng. Sci.*, **2019**, 59(11), 2211–2219.
- 15 Yousefzade, O.; Jeddi, J.; Franco, L.; Puiggali, J.; Garmabi, H. Crystallization kinetics of chain extended poly(L-lactide)s having different molecular structures. *Mater. Chem. Phys.*, **2020**, 240, 122217.

- 16 Li, M.; Li, S. N.; Liu, B. J.; Jiang, T. H.; Zhang, D.; Cao, L. S.; He, L.; Gong, W. Rheological behavior, crystallization properties, and foaming performance of chain-extended poly(lactic acid) by functionalized epoxy. *RSC Adv.*, **2021**, 11(52), 32799–32809.
- 17 Park, M.; Choi, I.; Lee, S.; Hong, S. J.; Kim, A.; Shin, J.; Kang, H. C.; Kim, Y. W. Renewable malic acid-based plasticizers for both PVC and PLA polymers. *J. Ind. Eng. Chem.*, **2020**, 88, 148–158.
- 18 Coltelli, M. B.; Bertolini, A.; Aliotta, L.; Gigante, V.; Vannozzi, A.; Lazzeri, A. Chain extension of poly(lactic acid) (PLA)-based blends and composites containing bran with biobased compounds for controlling their processability and recyclability. *Polymers*, **2021**, 13(18), 3050.
- 19 Wei, L. Q.; McDonald, A. G. Peroxide induced crosslinking by reactive melt processing of two biopolyesters: poly(3-hydroxybutyrate) and poly(l-lactic acid) to improve their melting processability. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2015**, 132(13), 41724.
- 20 Standau, T.; Zhao, C. J.; Murillo Castellón, S.; Bonten, C.; Altstädt, V. Chemical modification and foam processing of polylactide (PLA). *Polymers*, **2019**, 11(2), 306.
- 21 Ikada, Y.; Jamshidi, K.; Tsuji, H.; Hyon, S. H. Stereo complex formation between enantiomeric poly(lactides). *Macromolecules*, **1987**, 20(4), 904–906.
- 22 Na, B.; Zhu, J.; Lv, R. H.; Ju, Y. H.; Tian, R. P.; Chen, B. B. Stereo complex formation in enantiomeric polylactides by melting recrystallization of homocrystals: crystallization kinetics and crystal morphology. *Macromolecules*, **2014**, 47(1), 347–352.
- 23 Lv, T. X.; Zhou, C. B.; Li, J. Q.; Huang, S. Y.; Wen, H. Y.; Meng, Y. F.; Jiang, S. C. New insight into the mechanism of enhanced crystallization of PLA in PLLA/PDLA mixture. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2018**, 135(2), 45663.
- 24 Jia, P.; Hu, J.; Zhai, W. T.; Duan, Y. X.; Zhang, J. M.; Han, C. Y. Cell morphology and improved heat resistance of microcellular poly(l-lactide) foam via introducing stereo complex crystallites of PLA. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2015**, 54(9), 2476–2488.
- 25 Liu, W.; He, S. C.; Yang, Y. J. Effect of stereo complex crystal on foaming behavior and sintering of poly(lactic acid) bead foams. *Polym. Int.*, **2019**, 68(3), 516–526.
- 26 Mihai, M.; Huneault, M. A.; Favis, B. D.; Li, H. B. Extrusion foaming of semi-crystalline PLA and PLA/thermoplastic starch blends. *Macromol. Biosci.*, **2007**, 7(7), 907–920.
- 27 Ahmed, M. F.; Li, Y.; Yao, Z.; Cao, K.; Zeng, C. C. TPU/PLA blend foams: enhanced foamability, structural stability, and implications for shape memory foams. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2019**, 136(17), 47416.
- 28 Nofar, M.; Tabatabaei, A.; Sojoudiasli, H.; Park, C. B.; Carreau, P. J.; Heuzey, M. C.; Kamal, M. R. Mechanical and bead foaming behavior of PLA-PBAT and PLA-PBSA blends with different morphologies. *Eur. Polym. J.*, **2017**, 90, 231–244.
- 29 Gao, H. F.; Li, J. W.; Li, Z. H.; Li, Y. Y.; Wang, X. F.; Jiang, J.; Li, Q. Enhancing interfacial interaction of immiscible PCL/PLA blends by *in-situ* crosslinking to improve the foamability. *Polym. Test.*, **2023**, 124, 108063.
- 30 Sun, Z. Y.; Wang, L.; Zhou, J. Y.; Fan, X.; Xie, H. H.; Zhang, H.; Zhang, G. C.; Shi, X. T. Influence of polylactide (PLA) stereo complexation on the microstructure of PLA/PBS blends and the cell morphology of their microcellular foams. *Polymers*, **2020**, 12(10), 2362.
- 31 Nofar, M.; Tabatabaei, A.; Park, C. B. Effects of nano-/micro-sized additives on the crystallization behaviors of PLA and PLA/CO<sub>2</sub> mixtures. *Polymer*, **2013**, 54(9), 2382–2391.
- 32 Ji, G. Y.; Zhai, W. T.; Lin, D. P.; Ren, Q.; Zheng, W. G.; Jung, D. W. Microcellular foaming of poly(lactic acid)/silica nanocomposites in compressed CO<sub>2</sub>: critical influence of crystallite size on cell morphology and foam expansion. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2013**, 52(19), 6390–6398.
- 33 Nofar, M. Effects of nano-/micro-sized additives and the corresponding induced crystallinity on the extrusion foaming behavior of PLA using supercritical CO<sub>2</sub>. *Mater. Des.*, **2016**, 101, 24–34.
- 34 Crawford, E. A.; Mekonnen, T. H. Effects of chain extension and clay reinforcement on PLA nanocomposite foams. *React. Funct. Polym.*, **2025**, 209, 106183.
- 35 Borkotoky, S. S.; Dhar, P.; Katiyar, V. Biodegradable poly(lactic acid)/cellulose nanocrystals (CNCs) composite microcellular foam: effect of nanofillers on foam cellular morphology, thermal and wettability behavior. *Int. J. Biol. Macromol.*, **2018**, 106, 433–446.
- 36 Zheng, T.; Pilla, S. Melt processing of cellulose nanocrystal-filled composites: toward reinforcement and foam nucleation. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2020**, 59(18), 8511–8531.
- 37 Zhang, Y. C.; DuVigneau, J.; Sui, X. F.; Vancso, G. J. Foaming of polylactic acid/cellulose nanocrystal composites: pickering emulsion templating for high-homogeneity filler dispersions. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2022**, 4(1), 111–120.
- 38 Corre, Y. M.; Maazouz, A.; Duchet, J.; Reignier, J. Batch foaming of chain extended PLA with supercritical CO<sub>2</sub>: influence of the rheological properties and the process

- parameters on the cellular structure. *J. Supercrit. Fluids*, **2011**, 58(1), 177–188.
- 39 Li, B.; Zhao, G. Q.; Wang, G. L.; Zhang, L.; Gong, J.; Shi, Z. L. Super high-expansion poly(lactic acid) foams with excellent oil-adsorption and thermal-insulation properties fabricated by supercritical CO<sub>2</sub> foaming. *Adv. Sustain. Syst.*, **2021**, 5(5), 2000295.
- 40 Matuana, L. M.; Diaz, C. A. Study of cell nucleation in microcellular poly(lactic acid) foamed with supercritical CO<sub>2</sub> through a continuous-extrusion process. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2010**, 49(5), 2186–2193.
- 41 Su, Y. Z.; Huang, P. K.; Sun, J.; Chen, J. L.; Zheng, H.; Luo, H. B.; Chong, Y. K.; Zhao, Y. Q.; Wu, F.; Zheng, W. G. Extruded polylactide bead foams using anhydrous supercritical CO<sub>2</sub> extrusion foaming. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2023**, 140(42), e54557.
- 42 Hayashi, R. Characteristics and cases of inert gas microcellular foaming and supercritical foaming molding. *Japan Plastics*, **2025**, 76(2), 18–21.
- 43 Jiang, J. J.; Wang, L.; Tian, F. W.; Li, Y. Z.; Zhai, W. T. Polymer bead foams: a review on foam preparation, molding, and interbead bonding mechanism. *Macromol.*, **2023**, 3(4), 782–804.
- 44 Peng, K. M.; Mubarak, S.; Diao, X. F.; Cai, Z. W.; Zhang, C.; Wang, J. L.; Wu, L. X. Progress in the preparation, properties, and applications of PLA and its composite microporous materials by supercritical CO<sub>2</sub>: a review from 2020 to 2022. *Polymers*, **2022**, 14(20), 4320.
- 45 Oluwabunmi, K.; D'Souza, N. A.; Zhao, W. H.; Choi, T. Y.; Theyson, T. Compostable, fully biobased foams using PLA and micro cellulose for zero energy buildings. *Sci. Rep.*, **2020**, 10(1), 17771.
- 46 DeStefano, V.; Khan, S.; Tabada, A. Applications of PLA in modern medicine. *Eng. Regen.*, **2020**, 1, 76–87.
- 47 Choi, W. J.; Hwang, K. S.; Kwon, H. J.; Lee, C.; Kim, C. H.; Kim, T. H.; Heo, S. W.; Kim, J. H.; Lee, J. Y. Rapid development of dual porous poly(lactic acid) foam using fused deposition modeling (FDM) 3D printing for medical scaffold application. *Mater. Sci. Eng. C*, **2020**, 110, 110693.
- 48 Meaney, K.; Gong, K.; Gaffney, M.; Portela, A.; Devine, D.; O'Donnell, C.; Chen, Y. Y. Investigation of mechanical and physical properties of chemically foamed polylactic acid for the purpose of plant growth. *Polymer*, **2025**, 324, 128243.