

第19届全国包装工程学术会议专栏

植物纤维多孔材料泡孔分布影响因素

王哲，李琛

(东北林业大学 工程技术学院，哈尔滨 150040)

摘要：目的 分析影响植物纤维多孔材料泡孔分布的各种因素，探究泡孔结构对性能的影响，为制备泡孔均匀分布、缓冲性能良好的多孔材料提供理论基础。**方法** 归纳总结国内外植物纤维多孔材料泡孔结构的研究进展，探讨多孔材料的发泡机理，系统地阐述成型工艺、助剂种类、助剂含量等对植物纤维多孔材料泡孔结构的影响。**结果** 通过分析得出各种影响因素的作用规律，为进一步完善植物纤维多孔材料的制备方案，开发泡孔分布均匀、性能稳定的植物纤维发泡材料提供依据。**结论** 通过制定科学的实验方案，可以制备出泡孔分布均匀的多孔材料，其可作为缓冲材料，在包装领域中有巨大的市场需求。

关键词：多孔材料；泡孔结构；工艺成型；助剂

中图分类号： TB484.2 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2022)01-0026-09

DOI： 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.01.004

Affecting Factors of Cell Distribution of Plant Fiber Porous Materials

WANG Zhe, LI Chen

(College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze various factors that affect the cell distribution of plant fiber porous materials and explore the effect of cell structure on properties, so as to provide a theoretical basis for preparing porous materials with uniform cell distribution and good cushioning properties. The research progress of cell structure of plant fiber porous materials at home and abroad was summarized, the foaming mechanism of porous materials was discussed, and the effects of molding process, types of additives, and content of additives on cell structure of plant fiber porous materials were systematically explained. Through analysis, the law of action of various affecting factors was obtained, which provided a basis for further improving the preparation plan of plant fiber porous materials and developing plant fiber foam materials with uniform cell distribution and stable performance. By formulating a scientific experimental program, a porous material with uniform cell distribution can be prepared, which can be used as a buffer material, and has a huge market demand in the packaging field.

KEY WORDS: porous materials; cell structure; molding process; additives

在包装领域中，合成聚合物已经取代了一些材料，例如金属、陶瓷、塑料等，各种形式的商品塑料由于不可降解性，在被丢弃时就会产生生态和环境等一系列问题^[1]。随着经济日益增长和人民保护环境意

识的增强，环境友好的植物纤维发泡材料成为研究热点，该材料具有良好的缓冲性能、力学性能和吸声性等，绿色环保、生物基可再生、制备工艺简单、成本低廉等优点，在包装中不仅可以制作为包装内缓冲内

收稿日期：2021-09-28

基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金（2572018BL07）

作者简介：王哲（1997—），女，东北林业大学硕士生，主攻生物基包装材料。

通信作者：李琛（1979—），女，东北林业大学副教授，主要研究方向为生物基包装材料。

衬, 也可以制作成填充颗粒物以取代聚烯烃类泡沫塑料^[2], 还可应用在墙体建筑^[3—4]、吸声材料^[5—6]、污水处理、油水分离和液体吸附^[7]等领域。

目前, 虽然相关研究在植物纤维多孔缓冲发泡材料的成型工艺以及最佳配比方面都取得了不同的阶段性进展, 但是对植物发泡材料泡孔分布影响因素的研究较少, 泡孔是否均匀分布直接影响着发泡材料的缓冲性能, 要使制品达到泡孔均匀, 就要严格控制发泡过程中的工艺参数^[8]。文中着重研究植物纤维多孔材料在发泡过程影响泡孔结构的因素, 分别对加工成型工艺、添加助剂种类和含量等对泡孔结构的影响进行总结和分析, 为制备具有均匀稳定泡孔结构的植物纤维发泡材料提供参考依据。

1 发泡原理

植物纤维多孔发泡材料与传统的塑料发泡材料的泡沫结构不相同, 前者内部交联结构由纤维表面的氢键相互连接形成^[9], 后者以树脂为主要原料发泡制成, 其内部具有无数微孔结构^[10], 这 2 种发泡材料的发泡机理相通。泡孔形成的整个过程包括气泡成核阶段、气泡核膨胀生长阶段、气泡的稳定固化阶段, 见图 1。

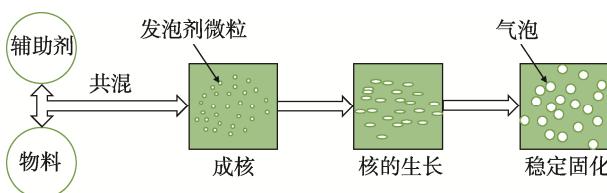


图 1 发泡材料气泡成型过程
Fig.1 Cell forming process of foam material

1) 气泡成核阶段。聚合物熔体中的气体分子自由分散并形成稳定状态的气相过程, 此过程中气体在溶液中过饱和形成气泡核^[11]。加入成核剂, 气泡可在较低的气液饱和状态下产生, 有助于提高泡沫生成速度和泡孔密度。经典成核理论被广泛用于描述自由发泡成核的过程, 发泡过程中的成核密度决定着泡孔密度。气泡成核的经典理论主要有均相成核和异相成核, 其中均相成核速率的计算见式(1—2), 异相成核速率的计算见式(3—5)^[12]。

$$N_{\text{hom}} = C_0 f_0 \exp\left(\frac{-\Delta G_{\text{hom}}^*}{KT}\right) \quad (1)$$

$$\Delta G_{\text{hom}}^* = \frac{16\pi\sigma_{\text{gm}}^3}{3\Delta P^2} \times S(\theta) \quad (2)$$

式中: N_{hom} 为气泡均相成核的成核速率 (个/(cm³·s)); C_0 为单位体积熔体中气体分子浓度 (个/cm³); f_0 为气体分子加入气泡核的频率因子 (s⁻¹); K 为 Boltzmann 常数, 取 1.38×10^{-23} J/K; T 为热力学温

度 (K), ΔG_{hom}^* 为均相成核时所需克服的 Gibbs 自由能 (活化能垒); σ_{gm} 为气-熔界面张力; ΔP 为气泡内外压差。

$$N_{\text{het}} = C_1 f_1 \exp\left(\frac{-\Delta G_{\text{het}}^*}{KT}\right) \quad (3)$$

$$\Delta G_{\text{het}}^* = \frac{16\pi\sigma_{\text{gm}}^3}{3\Delta P^2} \times S(\theta) \quad (4)$$

$$S(\theta) = \frac{1}{4}(2 + \cos\theta)(1 - \cos\theta)^2 \quad (5)$$

式中: N_{het} 为气泡异相成核的成核速率 (个/(cm³·s)); C_1 是异相成核点的气体分子浓度 (个/cm³); f_1 是气体分子撞击气泡核的频率因子 (s⁻¹); ΔG_{het}^* 为异相成核时所需克服的 Gibbs 自由能 (活化能垒); θ 是界面润湿角。

2) 气泡核膨胀生长阶段。通过提高溶解气体量或者增加温度, 促使气体膨胀以及气泡生长。当气体含量发生变化时, 会引起基体粘度变大, 泡沫不断合并, 从而产生了孔径更大的气泡, 泡孔的孔壁变薄甚至出现开孔^[13]。

气泡在生长的过程中, 形状发生变化, 一般由形状因子 F 来表示泡孔的结构, F 根据泡沫的二维截面的形态来计算, 见式(6)^[8]。

$$F = \frac{4\pi}{n} \sum_i^n \frac{a_i}{l_i^2} \quad (6)$$

式中: n 为总孔数; i 为孔数; l_i 为孔边界长度; a_i 为孔面积。

3) 气泡的稳定固化阶段。随着气体浓度的降低, 泡孔数目确定, 聚合物由液相转化到固相, 直到达到平衡状态, 形成固体泡沫。为了更好地稳定泡孔, 防止泡孔合并, 其中有 2 个途径: 加入表面活性剂降低界面张力; 控制加工工艺的温度和时间^[14]。浆料的熔体强度是影响气泡稳定固化的关键因素, 适中的熔体强度可以防止气泡壁变薄, 气泡有利于被气泡壁包围, 从而稳定气泡^[15]。

2 成型工艺对泡孔结构的影响

目前有很多研究是关于某种特定成型工艺参数对植物发泡材料微观形貌和力学性能的影响, 多孔材料的缓冲性能主要取决于泡孔结构参数, 包括泡孔密度、孔隙率和泡孔分布, 泡孔分布均匀性根据孔径大小和孔隙面积占比决定^[16]。塑料发泡材料的制备常采用间歇成型法、注射成型法、连续挤出成型法等, 使其具有微孔结构^[17]。植物纤维发泡材料主要的成型工艺方法包括模压发泡成型、挤出发泡成型、烘焙发泡成型、微波加热发泡成型^[18]等。

2.1 模压发泡成型

模压发泡成型是在固定的模具中对浆料进行加

压或减压/放气来制备发泡材料。在模压法制备发泡材料时上下压板的温度、模压压力和成型时间都会影响泡孔结构和发泡材料的性能，其特点是发泡时间短、整体简单、易于操作。郭安福^[19]以植物纤维、淀粉为主要原料制备生物可降解的餐具时，其最佳工艺条件：上模温度为 175.786~179.064 °C，下模温度为 171.216~178.048 °C，采用新型模具成型时间为 75 s，得到餐具的缓冲性较好且隔热保温。

模压发泡成型中，模压温度和模压压力对泡孔尺寸和密度的影响更显著，在 Guan 等^[20]的研究中表明预热时间也是重要因素之一，预热时间过长就会导致发泡剂在加压前分解，从而释放大量气体，形成较低的泡孔密度和较大的泡孔尺寸。当模压压力较小时，发泡剂分解不充分，得到的泡孔数量较少且尺寸较小^[21]。增加模压压力实际上增加了浆体内部的气体浓度，在释放压力时基材的过饱和度较大，使得泡孔密度增加^[22]。郁青^[23]采用淀粉/秸秆纤维为复合材料制备发泡材料，通过不同的模压温度、模压时间和模压压力对发泡材料密度和缓冲性能进行测试，结果显示，在模压压力为 2.0 MPa、模压温度为 160 °C、模压时间为 17 min 下得到的发泡材料密度适中，缓冲性能良好。Salgado 等^[24]以淀粉、20%（质量分数）纤维、10%（质量分数）蛋白质为主要原料，添加其他助剂，在热压温度为 150~155 °C，压力为 0.36 MPa，热压时间为 3 min 的条件下获得的发泡材料泡孔密度较大，泡孔分布均匀且具有较好的力学性能。

模压完成后，准备开模，取出发泡体，如果开模时间延后，片材会在较高温度下进行烘烤，发泡剂水分就会慢慢散失，片材表面干燥^[25]，影响泡孔分布，导致性能下降。

2.2 挤出发泡成型

挤出发泡成型法常被应用于制造应用物理发泡剂的低密度泡沫材料，如 PVC、PE、PP、PLA 等，也常与超临界流体气体（CO₂、N₂）搭配进行制备；也有一些研究应用挤出发泡方法制备纤维类发泡材料，成型机理相同。影响挤出发泡成型的 3 个主要因素包括挤出温度、螺杆转速和挤出压力，需根据材料性能要求选择合适的挤出条件。

Hassan 等^[26]研究表明，聚乳酸/红麻纤维复合材料在较高的挤压温度挤出时，复合材料的结构不紧凑且粗糙，在较低的挤压温度下，复合材料表现出均匀、致密、光滑的形态结构，且密度较低。从实验结果发现，挤出温度不同，发泡倍率也会发生相应的变化，温度过高或过低都会影响助剂的分解，使浆体不能在适当的条件下发泡，得不到均匀细密的泡孔结构^[27]。挤出温度应根据浆体和发泡剂的分解温度来设定。机头温度对发泡的影响也较为显著，机头温度过高，导

致气体逃逸，发泡倍率降低；随着温度的降低，发泡倍率大幅度增加^[28]。

在基于淀粉的泡沫挤出成型中，所使用的料筒温度和螺杆转速通常分别在 120~170 °C 和 70~400 r/min，机筒温度和螺杆速度的增加一般情况下会引起气泡的数量增加，扩大挤出泡沫的膨胀率，导致泡沫密度降低^[29~30]。Guan 等^[31]对乙酰化淀粉/纤维素泡沫的研究中发现，当机筒温度和螺杆转速增加时，泡沫膨胀率会先升高，然后随着温度的持续升高而降低，这是因为在太高的温度下浆料粘度较低阻碍了其膨胀。

挤出压力可以改变泡孔的大小和尺寸，当挤出压力较低时，不利于气体向外膨胀，分布不均，容易在浆料强度较低处先膨胀，导致泡孔分布不均，见图 2^[32]。彭惠丽^[33]研究了螺杆转速、加工温度和干燥方式对废纸纤维/淀粉复合发泡材料的影响，结果表明，当螺杆转速为 35 r/min，加工温度为 80、90、85 °C，选择微波干燥的方式，制备的发泡材料挤出稳定、结构紧密且具有一定的缓冲性能。挤出发泡并不是产生良好多孔结构的最有效方法，很难控制孔隙率，有时还会产生溶剂的残留物。

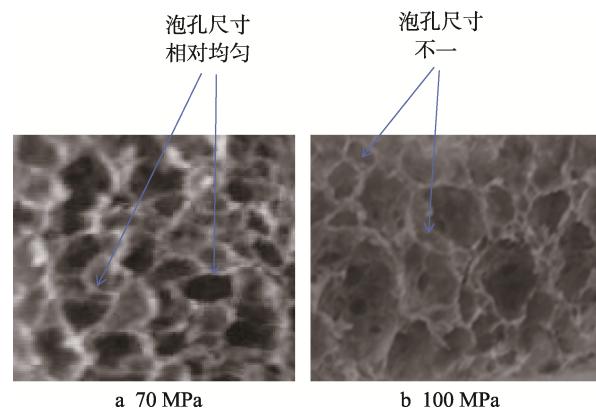


图 2 不同挤出压力下泡孔形态
Fig.2 Cell morphology under different extrusion pressure

2.3 烘焙发泡成型

烘焙发泡成型是将共混物料在烘焙模型中加热发泡的一种发泡成型方法，成型时需加入脱模剂，以便制品脱模^[34]。烘焙时，浆料中的水分会迅速蒸发，使其迅速膨胀填充整个模具，残留的水分会进一步蒸发，最后逐渐干燥形成发泡材料^[35]。模具的大小和形状影响着泡沫的形状和厚度^[36]，也影响着泡沫的泡孔分布。要得到泡孔均匀分布的发泡体，也要考虑烘焙时间和温度。

烘焙时间过短，浆料里的发泡剂不能完全分解，残留的水分较多，导致发泡体密度较大，强度较低；时间过长，浆料里的水分进一步蒸发，导致发泡体干燥较脆，强度和密度也并不理想^[37]。另外，烘焙时间

与基体的本身性质和复合材料中添加的纤维含量有关, 在其他适合的条件下, 尽可能缩短烘焙时间可以降低工艺成本^[38]。Mello 等^[39]研究了不同浓度的麦芽蔗渣与木薯淀粉复合制成的泡沫托盘, 研究结果表明, 生产的每个托盘均具有良好的形貌特征, 麦芽蔗渣能够均匀分布在聚合物基质中, 并且蔗渣浓度越高, 烘焙时间越长。

烘焙温度过高会导致浆料里的水分迅速蒸发, 使浆料急剧膨胀, 泡孔尺寸过大甚至会发生破裂, 出现部分塌陷现象; 温度过低, 就会导致发泡剂不能完全分解, 得到的泡孔尺寸较小^[40]。Cinelli 等^[41]采用烘焙法制备以玉米秸秆纤维、马铃薯淀粉和聚乙烯醇为原料的发泡材料, 研究结果显示, 在烘焙温度为 200 °C, 烘焙时间为 2~3 min 时, 复合发泡材料的发泡效果较好。

2.4 微波发泡成型

微波发泡成型采用电磁辐射原理, 使混合物中的极性分子在电磁场作用下进行有规律的周期运动, 由于受到附近分子的干扰和阻碍, 会产生类似于摩擦的效应, 使物料温度升高进行发泡, 进而得到成型材料^[42], 具有加热效率快、受热均匀等特点, 材料性质可以通过改变微波输入功率、加热温度和加热时间来进行优化^[43]。

当微波功率较小时, 浆料升温速度慢, 发泡剂还没完全反应, 材料就已经固化干燥, 导致材料孔隙率和泡孔直径较小; 微波功率过大时, 浆料温度急剧升高, 造成泡孔合并或者破裂, 导致孔径大小分布不均^[44]。Kraus 等^[45]研究发现, 增加微波功率可以使浆料中的水分在发泡过程中快速蒸发, 从而增加蒸汽气泡的数量, 并减小了泡沫的孔径, 使浆料达到更多的膨胀。

温度也是影响气泡增长的因素之一, 发泡材料内部的温度随微波功率的增加而线性增加^[46], 控制温度实质是控制发泡剂的分解和气泡的内压, 当发泡温度较低时, 发泡速率较慢; 随着加热温度的升高, 泡孔的孔径逐渐增加, 形成开孔结构; 当发泡温度过高时, 发泡速率大于固化速率, 泡孔容易破裂, 形成合并^[47]。

微波加热时间过短, 会导致发泡剂不能完全分解, 加热时间过长会加快水分子的气化和发泡剂的分解速率, 出现气泡合并、气泡破裂现象, 造成发泡材料塌陷^[48]。柴希娟等^[49]以蔗渣纤维为主要原料, 用微波辐照加热技术制备发泡材料, 当微波功率为 800 W, 加热时间为 1 min 时, 得到的发泡材料气泡分布较均匀, 缓冲性能较好。Lopez-Gil 等^[50]采用微波加热成型研究不同纤维/淀粉复合发泡材料的性能, 研究表明当微波功率为 900 W, 加热时间为 50 s 时, 相较于单独的淀粉发泡材料, 得到的纤维/淀粉复合材料的强度较高且力学性能较好。

从上述几种成型工艺看, 挤出发泡成型应用较早, 由于其模口形状和大小的限制, 只能生产条状或片状的发泡材料, 在挤出发泡成型的过程中, 物料会受到许多因素的影响, 挤出发泡成型制备的材料泡孔不稳定; 与挤出发泡成型相比, 模压发泡成型的工艺流程相对简单, 加热成型速度快, 由于上下压片的限制, 可能会导致复合材料受热不均, 直接影响着泡孔的质量, 只能生产厚度较低的发泡材料; 烘焙发泡成型将原料放置在模具中, 得到的发泡材料大多表面密度较高, 烘焙发泡成型比挤出发泡成型制备的材料发泡密度较高; 微波发泡成型加热效率快, 受热均匀, 能生产出较好的泡孔结构, 微波成型工艺研究大多使用家用微波炉进行实验操作, 难以实现工业化生产。

3 不同助剂对泡孔结构的影响

助剂的选择是影响多孔材料泡孔稳定性的重要因素, 泡孔是否分布均匀与助剂的种类、含量有直接关系。常用的助剂包括发泡剂、成核剂、胶黏剂、交联剂、增塑剂等, 其中发泡剂、成核剂、胶黏剂对泡孔结构影响较为明显。

3.1 发泡剂

发泡剂对气泡的生长有重要的作用, 选择发泡剂的依据是发泡剂的分解温度、气体发生量、分解产物特性等^[51]。发泡剂分为物理发泡剂和化学发泡剂。常用的物理发泡剂有二氧化碳、丁烷、戊烷、氮气^[52~53]等, 国内大部分研究使用的是化学发泡剂, 常用的化学发泡剂有碳酸氢钠、碳酸氢铵、偶氮二甲酰胺^[54]等。

不同的发泡剂对发泡材料的泡孔数量、密度和结构等都有较大的影响。有研究结果显示, 将单独的碳酸氢氨或偶氮二甲酰胺作为发泡剂时, 使用偶氮二甲酰胺发泡的泡孔大小较均匀, 且泡孔数量分布较多^[55]。偶氮二甲酰胺的热分解分为 3 个阶段, 由表 1^[56]可知, 在不同的分解温度下会产生 N₂、CO、NH₃、CO₂ 等气体, 偶氮二甲酰胺具有自熄性, 有利于安全生产使用。对碳酸氢钠发泡剂来说, 可以增加泡孔的成核并稳定泡沫的增长^[57]。

国外研究者倾向于使用物理发泡剂, 在挤出过程中直接在低温下将二氧化碳或氮气注入超临界流体, 使材料中形成气泡, 这种方法相比传统的挤出工艺来说, 更容易控制挤出物的泡孔尺寸、单位面积的泡孔数^[58], 被常用作生产塑料发泡材料。在 Lee 等^[59]的实验结果中也证明了使用超临界 CO₂ 技术方法生产的材料具有更加均匀的微孔结构。

发泡剂含量会直接影响生成气体的多少。发泡剂含量较低时, 生成的气体较少, 影响气泡的生长; 发

表 1 偶氮二甲酰胺在不同分解温度下产生的气体
Tab.1 Gas generated by azodicarbonamide at different decomposition temperature

分解步骤	热分解机理(分解反应式)	产生气体
1	$\text{H}_2\text{N}-\overset{\text{O}}{\underset{\parallel}{\text{C}}}-\text{N}=\text{N}-\overset{\text{O}}{\underset{\parallel}{\text{C}}}-\text{NH}_2 \longrightarrow \text{N}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{N}-\overset{\text{O}}{\underset{\parallel}{\text{C}}}-\text{NH}_2$ $\text{H}_2\text{N}-\overset{\text{O}}{\underset{\parallel}{\text{C}}}-\text{NH}_2 \longrightarrow \text{HNCO} + \text{NH}_3$	$\text{N}_2, \text{CO}, \text{HNCO}, \text{NH}_3$
	$2\text{H}_2\text{N}-\overset{\text{O}}{\underset{\parallel}{\text{C}}}-\text{N}=\text{N}-\overset{\text{O}}{\underset{\parallel}{\text{C}}}-\text{NH}_2 \longrightarrow \text{N}_2\text{H}-\overset{\text{O}}{\underset{\parallel}{\text{C}}}-\text{NH}-\text{NH}-\overset{\text{O}}{\underset{\parallel}{\text{C}}}-\text{NH}_2 + 2\text{HNCO} + \text{N}_2$	N_2, HNCO
3	$\text{H}_2\text{N}-\overset{\text{O}}{\underset{\parallel}{\text{C}}}-\text{NH}-\text{NH}-\overset{\text{O}}{\underset{\parallel}{\text{C}}}-\text{NH}_2 \longrightarrow \begin{matrix} \text{NH}-\text{H} \\ \\ \text{O}=\text{C}-\text{NH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \end{matrix} + \text{NH}_3$	NH_3, CO_2

泡剂过量时,生成气体较多,膨胀过快,导致泡孔直径较大,泡孔质量较低^[60]。只有适当的发泡剂用量产生的气体量才能得到泡孔分布均匀、质量较好的发泡材料。

使用化学发泡剂时会产生副产物,对研究者本身和环境可能会造成危害,且使用化学发泡剂有一定的价格成本,使用物理发泡剂相对成本较低,发泡时不会产生其他残余气体,物理发泡方法使用的设备投资相对较大,要根据研究的实验条件和预期的实验结果选择合适的发泡剂和添加比例。

3.2 成核剂

气泡的成核过程作为第1阶段非常重要。添加成核剂可以增加气孔的形成,影响泡孔的密度和泡孔的尺寸分布^[61],进而影响发泡材料的性能。成核过程中影响的因素与最终泡孔的孔径直接相关,成核剂的种类、含量、形状和分散性能等都影响成核率^[62~64]。

加入成核剂可用于生产高密度和孔径均匀分布的微孔泡沫,如滑石粉、碳酸钙、硅藻土^[65]等。有研究结果表明,当以NaHCO₃为发泡剂时,可以用等量的柠檬酸作为成核剂,反应生成二氧化碳,致使混合物体积膨胀,产生大量气泡,形成疏松的结构^[66]。滑石粉作为国内外研究者公认的成核剂之一,其原料丰富且价格低廉,具有耐热性好、硬度高、尺寸稳定性好等优点。加入滑石粉成为体系中的成核点,形成更多的气泡核,且不与其他助剂发生反应。也有研究显示加入滑石粉后,复合材料的结晶温度增加,泡孔尺寸减小,泡孔平均密度增加,且泡孔孔径分布均匀^[67]。

碳酸钙是一种使用较多的无机填料,加入碳酸钙可以提高发泡材料的拉伸强度和硬度,使泡孔的孔径较小且密度较高^[68]。碳酸钙对材料外观、内部泡孔大小和结构影响效果较良好。硅藻土的主要成分为无定

型的SiO₂,硅藻土作为填料,不仅可以提高泡孔密度、孔隙分布均匀性进而形成稳定的泡孔结构,还可以降低成本^[69]。当添加相同量的碳酸钙和硅藻土时,前者的孔径大小要小于后者,说明碳酸钙的成核效果要优于硅藻土,且形成了更小的泡孔,分布更均匀^[70]。

材料泡孔的结构也随着成核剂含量的变化而变化。通过改变滑石粉含量进而控制泡孔密度,在发泡剂含量固定时,随着滑石粉含量的增加,泡沫的膨胀速率加快,从而增加了泡孔密度和泡沫中泡孔层数的数量^[71];当碳酸钙含量增加时,混合材料可能会由于水分散失过多,材料较脆造成裂痕。当添加成核剂含量较少时,泡孔尺寸分布不均且结构不规则;当添加含量过量时,会使材料的密度升高,致使材料表面过硬。要适当增加成核剂的含量,可以增加体系中的成核点,减小孔径尺寸,增加泡孔密度,形成均匀分布的泡孔结构。

3.3 胶黏剂

胶黏剂的作用是使纤维与其他助剂混合进行发泡时,使纤维紧密连接并包裹住发泡剂产生的气体,形成泡孔结构均匀分布的多孔材料,胶黏剂可以使纤维间形成三维网状,发泡过程形成的气泡增强纤维间的拉伸力^[14]。不同的胶黏剂对泡孔的影响各不相同,常用胶黏剂包括淀粉、聚乙烯醇(PVA)、明胶等。

淀粉类胶黏剂属于环境友好型的天然胶黏剂,其无毒、无味、环保,价格低廉,具有较好的粘结性。由于淀粉胶黏剂的耐水性较差,因此需对其水溶液进行预糊化改性处理。在胶黏剂的选择中,成膜程度也是影响材料泡孔结构的因素之一。淀粉胶黏剂的缺点还有成膜性能较差,改善其性能的方法就是加入一些催干剂,如钠型改性的膨润土、高岭土,提高成膜速度,缩短时间^[72]。

聚乙烯醇具有很强的成膜性，提高物料的粘结性，可有效地防止气体的逸出。单独使用淀粉或聚乙烯醇作为胶黏剂时，其发泡效果一般，仅生成少量泡孔^[73]。大部分学者选择淀粉与聚乙烯醇混合成复配胶黏剂，糊化后的淀粉颗粒镶嵌在PVA分子中，使复配胶黏剂具有更好的粘结性，且适用温度范围更广^[74]。

明胶的分散效果良好，增稠性较差，单独使用时，发泡体表面会出现塌陷现象。使用明胶时，要与其他胶黏剂进行复配，如明胶/聚乙烯醇/甲基纤维素复配、明胶/羧甲基纤维素/瓜尔胶复配。

胶黏剂的含量也直接影响着整个体系的发泡效果。虽然随着胶黏剂含量的增加，材料的泡孔密度变大，强度也增加，但是发泡倍率减小且容易形成固状结构，气体无法膨胀，导致发泡效果不好^[75]。当胶黏剂含量较低时，会导致泡孔分布不均，材料内部出现中空或泡孔合并等现象。当单独使用预糊化淀粉时，成型效果差且出现塌陷现象；单独使用聚乙烯醇时，泡孔致密，材料间的孔隙较小；在使用淀粉/聚乙烯醇复配胶黏剂时，随着聚乙烯醇占比的增加，泡孔密度增加，泡孔孔径较小。淀粉与聚乙烯醇的使用比例在合适的范围内，且胶黏剂的用量也控制在一定范围内，才能得到泡孔分布均匀、发泡效果较好的复合材料。

4 结语

植物纤维发泡材料在缓冲运输包装中有良好的应用前景，添加不同的助剂可以满足多种性能要求。对于泡孔分布情况的测试中，由于泡孔形状的不规则性，常采用目测法进行表征界定泡孔分布的均匀性，存在主观性强、准确性差的局限性，需要采用更科学的测试方法进行评价。另外，在加工成型工艺方面，对于微波成型、烘焙成型和模压成型中选择合适发泡的模具，有利于更准确控制发泡过程以提高发泡质量。从环境保护、可持续发展的角度考虑，植物纤维多孔材料有替代聚烯烃泡沫塑料的趋势，研究发泡机理和调控发泡材料泡孔结构得到性能稳定的新型缓冲材料具有巨大的研究潜力，需要科技人员进一步开展研究。

参考文献:

- [1] MOHANTY A K, MISRA M, HINRICHSEN G. Biofibres, Biodegradable Polymers and Biocomposites: An Overview[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2000, 277(1): 1-24.
- [2] 曹绍文, 吴其叶. 发泡型植物纤维缓冲包装材料[J]. 中国包装工业, 2002(9): 8-11.
- CAO Shao-wen, WU Qi-ye. The Buffer Packaging Material from Foaming Vegetable Fibre[J]. China Packaging Industry, 2002(9): 8-11.
- [3] QIN Chen-ni, YAO Ming-zhu, LIU Yang, et al. MFC/NFC-Based Foam/Aerogel for Production of Porous Materials: Preparation, Properties and Applications[J]. Materials, 2020, 13(23): 5568.
- [4] YILDIRIM N, SHALER S M, GARDNER D J, et al. Cellulose Nanofibril (CNF) Reinforced Starch Insulating Foams[J]. Cellulose, 2014, 21(6): 4337-4347.
- [5] ECHEVERRIA C A, PALEVANI F, HANDOKO W, et al. Engineered Hybrid Fibre Reinforced Composites for Sound Absorption Building Applications[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 143: 1-14.
- [6] PÖHLER T, JETSU P, ISOMOISIO H. Benchmarking New Wood Fibre-Based Sound Absorbing Material Made with a Foam-Forming Technique[J]. Building Acoustics, 2016, 23(3): 131-143.
- [7] DE OLIVEIRA J P, BRUNI G P, EL HALAL S L M, et al. Cellulose Nanocrystals from Rice and Oat Husks and Their Application in Aerogels for Food Packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 124: 175-184.
- [8] 史铿瑛, 刘晔. 缓冲包装材料发泡机理及泡体破坏因素的研究[J]. 包装工程, 2007, 28(7): 31-33.
- SHI Zeng-ying, LIU Ye. Research of the Foaming Mechanism and Bubble Destruction Factors of Cushioning Foaming Material[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(7): 31-33.
- [9] 郭震, 黄俊彦. 植物纤维类发泡材料的成型机理及生物发泡方法探讨[J]. 包装工程, 2010, 31(15): 55-57.
- GUO Zhen, HUANG Jun-yan. Discussion on the Forming Mechanism of Plant Fiber Foaming Material and Biological Foaming Method[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(15): 55-57.
- [10] 肖军. 聚丙烯发泡塑料性能突显研究开发大有可为[J]. 湖南包装, 2014(1): 23-29.
- XIAO Jun. PP Foam Plastic Performance Highlights the Research and Development[J]. Hunan Packaging, 2014(1): 23-29.
- [11] 黄鹤. HDPE/竹粉复合发泡材料的成型机理及性能的研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2016: 6-10.
- HUANG He. Investigation on the Performance and Forming Mechanism of HDPE/Bamboo Powder Foam Composite[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2016: 6-10.
- [12] 蔡业彬, 国明成, 彭玉成, 等. 泡沫塑料加工过程中的气泡成核理论(I)--经典成核理论及述评[J]. 塑料科技, 2005(3): 11-16.
- CAI Ye-bin, GUO Ming-cheng, PENG Yu-cheng, et al. Research on Bubble Nucleation Theory during the Process of Foam Plastics (I) - Review and Classical Theory of Bubble Nucleation[J]. Plastic Science and Technology, 2005(3): 11-16.

- [13] 王静. 成核剂对软质聚氨酯泡沫微观结构及性能的影响[D]. 北京: 北京化工大学, 2018: 8-11.
WANG Jing. Effect of Nucleating Agent on Microstructure and Properties of Flexible Polyurethane Foam[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018: 8-11.
- [14] 李琛. 木质剩余物纤维多孔型材料制备及缓冲特性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013: 10-40.
LI Chen. Research on Preparation and Cushioning Properties of Wood Residues Fiber Porous Material[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013: 10-40.
- [15] 石璞, 欧阳龙, 蔡淑容. 植物纤维发泡材料的发泡机理与成型工艺探讨[J]. 包装学报, 2013, 5(3): 55-58.
SHI Pu, OUYANG Long, CAI Shu-rong. Discussion on Foaming Mechanism and Molding Process of Foaming Plant Fiber Material[J]. Packaging Journal, 2013, 5(3): 55-58.
- [16] 陈艳娜. 木质纤维发泡材料多孔形貌及力学性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015: 36-48.
CHEN Yan-na. The Research on Porous Morphology and Mechanical Properties of Wood Fiber Foaming Materials[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015: 36-48.
- [17] DI MAIO E, KIRAN E. Foaming of Polymers with Supercritical Fluids and Perspectives on the Current Knowledge Gaps and Challenges[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2018, 134: 157-166.
- [18] NANSU W, ROSS S, ROSS G, et al. Effect of Crosslinking Agent on the Physical and Mechanical Properties of a Composite Foam Based on Cassava Starch and Coconut Residue Fiber[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 17: 2010-2019.
- [19] 郭安福. 生物质全降解一次性餐饮具制品关键技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2011: 47-81.
GUO An-fu. Research on Key Technologies of Fully-Degradable Packing Materials[D]. Jinan: Shandong University, 2011: 47-81.
- [20] GUAN Rong, XIANG Bang-long, XIAO Zhao-xin, et al. The Processing-Structure Relationships in Thin Microcellular PET Sheet Prepared by Compression Molding[J]. European Polymer Journal, 2006, 42(5): 1022-1032.
- [21] 常萧楠, 何春霞, 付菁菁, 等. 模压压力和温度对PE/麦秆发泡复合材料的影响[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(12): 48-53.
CHANG Xiao-nan, HE Chun-xia, FU Jing-jing, et al. Effects of Molding Pressure and Temperature of PE/Wheat Straw Foam Composite[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(12): 48-53.
- [22] GUAN Rong, WANG Bi-qin, LU De-ping. Preparation of Microcellular Poly (Ethylene Terephthalate) and Its Properties[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 88(8): 1956-1962.
- [23] 郁青. 淀粉/秸秆发泡缓冲材料的制备及其性能研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009: 27-33.
YU Qing. Study on Preparation and Performance of Starch/Straw Foamy Cushioning Material[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009: 27-33.
- [24] SALGADO P R, SCHMIDT V C, MOLINA ORTIZ S E, et al. Biodegradable Foams Based on Cassava Starch, Sunflower Proteins and Cellulose Fibers Obtained by a Baking Process[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(3): 435-443.
- [25] 李静, 崔永岩, 张学盈, 等. 发泡工艺技术对淀粉发泡的影响[J]. 塑料, 2015, 44(3): 103-105.
LI Jing, CUI Yong-yan, ZHANG Xue-ying, et al. Effect of Process Technology on Starch Foaming[J]. Plastics, 2015, 44(3): 103-105.
- [26] HASSAN N A A, AHMAD S, CHEN R S, et al. Effect of Processing Temperature and Foaming Agent Loading on Properties of Polylactic Acid/Kenaf Fiber Composite Foam[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 7: 601-606.
- [27] SOHN J, KIM H, KIM S, et al. Biodegradable Foam Cushions as Ecofriendly Packaging Materials[J]. Sustainability, 2019, 11(6): 1731.
- [28] 王向东, 刘本刚, 陈士宏, 等. 聚丙烯挤出发泡中的关键技术--加工设备和成型工艺研究[J]. 中国塑料, 2006(4): 20-24.
WANG Xiang-dong, LIU Ben-gang, CHEN Shi-hong, et al. Key Technologies Used in Extrusion of Polypropylene Foam - Review on Equipment and Foaming Parameters[J]. China Plastics, 2006, 20(4): 20-24.
- [29] ZHANG Jian-feng, SUN Xiu-zhi. Biodegradable Foams of Poly (Lactic Acid)/Starch. I. Extrusion Condition and Cellular Size Distribution[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 106(2): 857-862.
- [30] ROBIN F, DUBOIS C, PINEAU N, et al. Expansion Mechanism of Extruded Foams Supplemented with Wheat Bran[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 107(1): 80-89.
- [31] GUAN Jun-jie, HANNA M A. Selected Morphological and Functional Properties of Extruded Acetylated Starch-Cellulose Foams[J]. Bioresource Technology, 2006, 97(14): 1716-1726.
- [32] 陈三梅. 竹粉/淀粉复合发泡材料的制备及其性能研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2014: 42-51.
CHEN San-mei. Investigation in Preparation and Properties of Bamboo Powder/Starch Foam Composites[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2014: 42-51.
- [33] 彭慧丽. 基于挤出工艺的生物质包装材料研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 39-56.
PENG Hui-li. Research on Biomass Packaging Materials by Extrusion[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 39-56.
- [34] 陈小健, 台立民. 淀粉基复合泡沫塑料制备工艺研究进展[J]. 中国塑料, 2010, 24(9): 1-5.

- CHEN Xiao-jian, TAI Li-min. Research Progress in Preparation Process of Starch-Based Foamed Plastics[J]. China Plastics, 2010, 24(9): 1-5.
- [35] SOYKEABKAEW N, SUPAPHOL P, RUJIRAVANIT R. Preparation and Characterization of Jute- and Flax-Reinforced Starch-Based Composite Foams[J]. Carbohydrate Polymers, 2004, 58(1): 53-63.
- [36] SOYKEABKAEW N, THANOMSILP C, SUWANTONG O. A Review: Starch-Based Composite Foams[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 78: 246-263.
- [37] 黄君, 王华林. 稻秆/淀粉发泡材料的制备与表征[J]. 安徽化工, 2011, 37(2): 21-24.
- HUANG Jun, WANG Hua-lin. Synthesis and Characterization of Foamed Corn Straw/Starch Material[J]. Anhui Chemical Industry, 2011, 37(2): 21-24.
- [38] SHOGREN R L, LAWTON J W, TIEFENBACHER K F. Baked Starch Foams: Starch Modifications and Additives Improve Process Parameters, Structure and Properties[J]. Industrial Crops & Products, 2002, 16(1): 69-79.
- [39] MELLO L R P F, MALI S. Use of Malt Bagasse to Produce Biodegradable Baked Foams Made from Cassava Starch[J]. Industrial Crops & Products, 2014, 55: 187-193.
- [40] 刘杨, 乔兆磊, 李珊珊, 等. 木薯渣纤维制备发泡缓冲包装材料的研究[J]. 包装工程, 2012, 33(19): 39-41.
- LIU Yang, QIAO Zhao-lei, LI Shan-shan, et al. Development of Foamed Cushion Packaging Material Using Cassava Residue[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(19): 39-41.
- [41] CINELLI P, CHIELLINI E, LAWTON J W, et al. Foamed Articles Based on Potato Starch, Corn Fibers and Poly(Vinyl Alcohol)[J]. Polymer Degradation and Stability, 2006, 91(5): 1147-1155.
- [42] 张桂红, 李翠翠. 微波在食品加工中应用的原理和特点[J]. 现代食品, 2020(5): 24-25.
- ZHANG Gui-hong, LI Cui-cui. Principles and Characteristics of Microwave Application in Food Processing[J]. Modern Food, 2020(5): 24-25.
- [43] DURAN-JIMENEZ G, MONTI T, TITMAN J J, et al. New Insights into Microwave Pyrolysis of Biomass: Preparation of Carbon-Based Products from Pecan Nutshells and Their Application in Wastewater Treatment[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2017, 124: 113-121.
- [44] 罗瑜莹. 杨木纤维多孔缓冲包装材料的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018: 70-96.
- LUO Yu-ying. Study on Preparation and Properties of Poplar Fiber Porous Cushioning Packaging Material[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018: 70-96.
- [45] KRAUS S, SCHUCHMANN H P, GAUKEL V. Factors Influencing the Microwave-Induced Expansion of Starch-Based Extruded Pellets under Vacuum[J]. Journal of Food Process Engineering, 2014, 37(3): 264-272.
- [46] BOISCHOT C, MORARU C I, KOKINI J L. Factors that Influence the Microwave Expansion of Glassy Amylopectin Extrudates[J]. Cereal Chemistry, 2003, 80(1): 56-61.
- [47] 夏学禹. 低醛高稳定三聚氰胺甲醛树脂的制备及其微波发泡[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 55-66.
- XIA Xue-yu. Preparation of Melamine Formaldehyde Resin with a Low Content of Free Formaldehyde and High Stability and Its Microwave Foaming[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019: 55-66.
- [48] 张惠莹. 废纸纤维发泡材料的配方优化及微波发泡工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013: 35-42.
- ZHANG Hui-ying. Research on Formula Optimization and Microwave Foaming Process of Waste Paper Fiber Foaming Materials[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013: 35-42.
- [49] 柴希娟, 张加研, 嵩焕军. 微波辐照蔗渣制备可降解发泡材料的工艺研究[J]. 林产化学与工业, 2009, 29(S1): 165-168.
- CHAI Xi-juan, ZHANG Jia-yan, HU Huan-jun. Study on Preparation of Biodegradable Foamed Material from Bagasse Fiber Using Microwave Irradiation[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2009, 29(S1): 165-168.
- [50] LOPEZ-GIL A, SILVA-BELLUCCI F, VELASCO D, et al. Cellular Structure and Mechanical Properties of Starch-Based Foamed Blocks Reinforced with Natural Fibers and Produced by Microwave Heating[J]. Industrial Crops & Products, 2015, 66: 194-205.
- [51] 马承银. 发泡剂的类型及加工特性[J]. 现代塑料加工应用, 1996(3): 37-42.
- MA Cheng-yin. Classification of Blowing Agents and Its Processing Characteristics[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 1996(3): 37-42.
- [52] QU Zhong-jie, YIN De-xian, ZHOU Hong-fu, et al. Cellular Morphology Evolution in Nanocellular Poly(Lactic Acid)/Thermoplastic Polyurethane Blending Foams in the Presence of Supercritical N₂[J]. European Polymer Journal, 2019, 116: 291-301.
- [53] HOSSIENY N J, BARZEGARI M R, NOFAR M, et al. Crystallization of Hard Segment Domains with the Presence of Butane for Microcellular Thermoplastic Polyurethane Foams[J]. Polymer, 2014, 55(2): 651-662.
- [54] 施克磊. 发泡剂体系对淀粉基发泡材料结构及性能影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 29-38.
- SHI Ke-lei. Effect of Foaming Agent System on the Structure and Properties of Starch-Based Foaming Materials[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020: 29-38.
- [55] 曾广胜, 林瑞珍, 郑良杰, 等. 不同发泡剂制备废纸浆增强淀粉基复合发泡材料性能的对比[J]. 功能材料, 2013, 44(1): 51-55.

- ZENG Guang-sheng, LIN Rui-zhen, ZHENG Liang-jie, et al. Comparison with Performance of Waste Paper Pulp Reinforced Starch-Based Foams with Different Foamer[J]. *Functional Materials*, 2013, 44(1): 51-55.
- [56] 陈立军, 陈焕钦. 活性物质对 AC 发泡剂性能的影响研究及其活化机理[J]. *绝缘材料*, 2005(1): 30-32.
- CHEN Li-jun, CHEN Huan-qin. Study on the Active Substances Effect on the Property of AC Blowing Agent and Their Activated Mechanism[J]. *Insulating Materials*, 2005(1): 30-32.
- [57] GEORGES A, LACOSTE C, DAMIEN E. Effect of Formulation and Process on the Extrudability of Starch-Based Foam Cushions[J]. *Industrial Crops & Products*, 2018, 115: 306-314.
- [58] JEONG H S, TOLEDO R T. Twin-Screw Extrusion at Low Temperature with Carbon Dioxide Injection to Assist Expansion: Extrudate Characteristics[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 63(4): 425-432.
- [59] LEE S, KANG K, JEONG M, et al. Evaluation of Supercritical CO₂ Dried Cellulose Aerogels as Nano-Biomaterials[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2017, 71(8): 483-486.
- [60] 李友良, 王家俊, 邵峰伟. 废纸浆发泡缓冲包装材料的研究[J]. *包装工程*, 2008, 29(11): 5-7.
- LI You-liang, WANG Jia-jun, SHAO Feng-wei. Study on Making Foam Cushion Packaging Material by Waste Paper Pulp[J]. *Packaging Engineering*, 2008, 29(11): 5-7.
- [61] SHEN Jiong, ZENG Chang-chun, LEE L J. Synthesis of Polystyrene-Carbon Nanofibers Nanocomposite Foams[J]. *Polymer*, 2005, 46(14): 5218-5224.
- [62] 杨心愿, 焦珊珊, 郑少秋, 等. 成核剂对硬质密胺泡沫孔结构及性能的影响[J/OL]. *化工新型材料*, 2021. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2357.TQ.2021-0304.1050.024.html>.
- YANG Xin-yuan, JIAO Shan-shan, ZHENG Shao-qiu, et al. Effects of Nucleating Agent on Cell Structure and Performance of Rigid Melamine Foam[J]. *New Chemical Materials*, 2021. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2357.TQ.20210304.1050.024.html>.
- [63] 葛铁军, 杨潇. 成核剂含量对酚醛泡沫性能的影响[J]. *沈阳化工大学学报*, 2015, 29(1): 23-27.
- GE Tie-jun, YANG Xiao. Effect of Nucleating Agent Content on the Properties of Phenolic Foam[J]. *Journal of Shenyang University of Chemical Technology*, 2015, 29(1): 23-27.
- [64] ZHAI Wen-tao, YU Jian, WU Li-chuan, et al. Heterogeneous Nucleation Uniformizing Cell Size Distribution in Microcellular Nanocomposites Foams[J]. *Polymer*, 2006, 47(21): 7580-7589.
- [65] 张国辉, 王雷, 王丽. 不同晶型成核剂在聚丙烯改性中的应用[J]. *塑料制造*, 2009(3): 49-52.
- ZHANG Guo-hui, WANG Lei, WANG Li. Applications of Different Crystalline Nucleating Agents in PP Modification[J]. *Plastics Manufacture*, 2009(3): 49-52.
- [66] 骆光林, 裴璐. 纸浆发泡缓冲材料研究[J]. *包装工程*, 2007, 28(5): 46-47.
- LUO Guang-lin, PEI Lu. Study on Pulp Foaming Buffer Material[J]. *Packaging Engineering*, 2007, 28(5): 46-47.
- [67] 李浩, 宋永明, 王海刚, 等. 滑石粉对微孔发泡木粉/聚丙烯复合材料结晶行为及泡孔结构的影响[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(8): 1636-1644.
- LI Hao, SONG Yong-ming, WANG Hai-gang, et al. Influence of Talc on Crystallization Behavior and Cellular Structure of Microcellular Foamed Wood Flour/PP Composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(8): 1636-1644.
- [68] GLENN G M, ORTS W J, NOBES G A R. Starch, Fiber and CaCO₃ Effects on the Physical Properties of Foams Made by a Baking Process[J]. *Industrial Crops & Products*, 2001, 14(3): 201-212.
- [69] HU Sheng-fei, ZHU Xian-bing, HU Wei, et al. Crystallization Behaviors and Foaming Properties of Diatomite-Filled Polypropylene Composites[J]. *Polymer Bulletin*, 2013, 70(2): 517-533.
- [70] 邵泽正. 成核剂对淀粉基发泡材料性能影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 16-28.
- SHAO Ze-zheng. Effect of Nucleation Agents on Starch-Based Foams[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020: 16-28.
- [71] NAGUIB H E, PARK C B, LEE P C, et al. A Study on the Foaming Behaviors of PP Resins with Talc as Nucleating Agent[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2006, 26(6): 565-587.
- [72] 李慧连, 刘国军, 张桂霞, 等. 淀粉胶黏剂的最新研究进展[J]. *化学与粘合*, 2008(5): 50-53.
- LI Hui-lian, LIU Guo-jun, ZHANG Gui-xia, et al. The Latest Progress in Study on Starch-Based Adhesives[J]. *Chemistry and Adhesion*, 2008(5): 50-53.
- [73] 蔡静. 植物纤维发泡缓冲材料的制备及性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017: 21-33.
- CAI Jing. Study on Preparation and Performance of the Plant Fiber Foam Cushioning Material[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017: 21-33.
- [74] 谢文娟. 改性淀粉胶黏剂的研究概况及展望[J]. *化学与粘合*, 2008(2): 52-54.
- XIE Wen-juan. Survey and Prospect of Study on Modified Starch Adhesive[J]. *Chemistry and Adhesion*, 2008(02): 52-54.
- [75] 张凤琴, 李小龙, 何农跃, 等. 稻草纤维制备缓冲材料的影响因素研究[J]. *包装工程*, 2010, 31(3): 14-17.
- ZHANG Feng-qin, LI Xiao-long, HE Nong-yue, et al. Study of Influencing Factors of Cushioning Material Preparation from Rice Straw Fiber[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(3): 14-17.