木薯淀粉 / 咖啡渣复合发泡材料的性能优化

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2026.3010

张万璐[1]　吴　爽[1]
王力弘[1]　卫灵君[1]
孙　昊[1,2]　杜天天[1]

1. 江南大学
机械工程学院
江苏省食品先进制造装备技术重点实验室
江苏　无锡　214122
2. 清华苏州环境创新研究院
江苏　苏州　215000

摘　要：针对纯淀粉基发泡材料力学性能和耐水性差的问题，以木薯淀粉为基质，以废弃咖啡渣为纤维填料，通过微波发泡工艺制备复合发泡材料，系统探究了咖啡渣、瓜尔豆胶和碳酸氢钠 3 种关键组分的添加量对发泡材料表观密度、发泡倍率、微观结构、疏水性和力学性能的影响规律，从而优化发泡材料综合性能。研究结果表明，咖啡渣可以作为异相成核剂和支撑骨架，瓜尔豆胶和碳酸氢钠分别可以发挥增强浆料黏弹性和提供发泡动力的作用。当 3 种组分质量分数分别为 30%, 0.6%, 5% 时，发泡材料内部形成较为均匀细密的泡孔结构，此时表观密度为 0.51 g/cm^3，发泡倍率为 2.07，表面水接触角达到 80.42°，压缩强度（50% 应变）为 0.41 MPa 的同时回弹率达到 67.65%。本研究通过配方优化制备出一种综合性能优良的木薯淀粉 / 咖啡渣复合发泡材料，为咖啡渣等食品废弃物的资源化利用提供有效途径。

关键词：生物质基发泡材料；木薯淀粉；咖啡渣；微波发泡
中图分类号：TB324；TS206.4　　**文献标志码：**A
文章编号：1674-7100(2026)03-0094-11
引文格式：张万璐，吴　爽，王力弘，等 . 木薯淀粉 / 咖啡渣复合发泡材料的性能优化 [J]. 包装学报，2026，18(3)：94-104.

传统石油基发泡塑料，如发泡聚苯乙烯，凭借其轻质特性和优异的缓冲隔热性能在各行各业得到广泛应用。然而，其不可生物降解的特性造成了严重的“白色污染”，对生态系统和人类健康构成长期威胁 [1]。随着全球消费者环保意识的增强和各种环保政策的实施，开发可完全生物降解的绿色替代材料迫在眉睫。

在此背景下，淀粉基发泡材料凭借其原料可再生、可完全生物降解及低成本等优势，被视为极具潜力的替代品之一 [2]。然而，纯淀粉基发泡材料存在力学强度低、脆性大和耐水性差等固有缺陷，极大地限制了其商业化应用 [3]。引入天然纤维作为增强填料是克服这些固有缺陷的一种有效策略 [4]。近年来，柑橘果皮 [5]、花生皮 [6]、鳄梨渣 [7] 等各种工农业废弃物都已被用作填料以提升淀粉基发泡材料的力学性能。但是，这些废弃物普遍存在成分与结构波动大、添加量有限和亲水性强等特点，可能会影响发泡材料性能的稳定性 [8]。相比之下，咖啡渣作为一种年产量巨大的食品加工废弃物，具有成分更加稳定、天然多孔且表面覆盖疏水油脂层的特点，在发挥增强作用的同时还可能赋予材料一定疏水性，适合作为淀粉基发泡材料的增强填料 [9-11]。

收稿日期：2026-02-02
基金项目：江苏省食品先进制造装备技术重点实验室自主研究课题资助项目（FMZ201905）
作者简介：张万璐，女，硕士生，主要研究方向为淀粉基发泡包装材料，E-mail：1353355854@qq.com
通信作者：孙　昊，女，副教授，博士，主要从事生物质资源综合利用、包装材料与结构研究，E-mail：sunhao@jiangnan.edu.cn

此外，发泡材料的性能优化离不开多种功能助剂的精准配比和协同作用[12]。常用的功能助剂包括增塑剂、增强剂、发泡剂等。天然多糖等增强剂可以通过与淀粉分子发生缠结和氢键作用，以提高基体的黏弹性，有助于基体在发泡过程中有效包裹和稳定气泡[13]。但过高的体系黏度会抑制气泡成核和膨胀，导致不均匀的泡孔结构和较高的密度。化学发泡剂的用量则直接影响发泡动力，过少时会使材料发泡不足，过多时又会导致气泡合并和结构塌陷[14]。目前已有许多关于发泡材料工艺和配方的研究[15−18]，但是在微波发泡过程中咖啡渣和上述多种助剂对淀粉基发泡材料的性能调控机制尚不明确。

基于此，本研究以木薯淀粉为基质，咖啡渣为增强填料，瓜尔豆胶、山梨醇和碳酸氢钠为功能助剂，采用微波发泡工艺制备环境友好的复合发泡材料，系统探究了咖啡渣和各助剂添加量对发泡材料的发泡特性、微观结构、疏水性能和力学性能的影响。本研究不仅为开发性能良好的淀粉基发泡材料提供理论依据，还为咖啡渣等食品废弃物的资源化利用开辟新途径。

1 实验部分

1.1 实验材料

木薯淀粉，白色粉末，购自广西高源淀粉有限公司。废弃咖啡渣，取自瑞幸咖啡门店，经去离子水洗涤并于 60 ℃烘箱中干燥至恒重，随后粉碎且过 40 目标准筛备用。瓜尔豆胶，分析纯级，黏度为 5000~5500 cps，购自上海源叶生物科技有限公司。山梨醇，分析纯级，纯度为 98%，购自北京华威锐科化工科技有限公司。碳酸氢钠，分析纯级，纯度不低于 99.5%，购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 实验方法

本研究采用单因素变量法探究咖啡渣和各助剂的添加量对发泡材料性能的影响。首先，取一定质量的瓜尔豆胶加入 10 g 去离子水中，搅拌均匀后得到瓜尔豆胶溶液；再称量总质量为 10 g 的木薯淀粉和咖啡渣，一定质量的山梨醇和碳酸氢钠加入瓜尔豆胶溶液中（咖啡渣和各助剂的添加量如表 1 所示，均是基于木薯淀粉和咖啡渣总干重的质量分数，下同），混合均匀后得到预发泡浆料；随后取 10 g 预发泡浆料倒入内径为 40 mm 的圆柱形聚四氟乙烯模具中，然后在 700 W 功率下微波发泡 30 s 得到木薯淀粉 / 咖啡渣复合发泡材料；最后，将发泡材料置于 60 ℃烘箱中 30 min 进行固化，随后转移至温度为 23 ℃、相对湿度为 50% 的恒温恒湿箱中平衡 24 h，以备后续性能测试。

表 1 单因素试验设计表

Table 1 Single-factor experimental design %

因素	瓜尔豆胶	咖啡渣	山梨醇	碳酸氢钠
水平 1	0.2	10	10	1
水平 2	0.4	20	10	3
水平 3	0.6	30	10	5
水平 4	0.8	40	10	7
水平 5	1.0	50	10	9

1.3 测试与表征

1.3.1 表观密度

表观密度（ρ）是发泡材料的基本特性之一。按照 GB/T 6343—2009《泡沫塑料及橡胶 表观密度的测定》中的方法测定发泡材料的表观密度。ρ的计算公式为

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

式中：m 为发泡材料质量，g；V 为发泡材料体积，cm^3。

1.3.2 发泡倍率

发泡倍率（K）用以表征材料的发泡特性，指材料发泡前后体积之比。K 的计算公式为

$$K = \frac{V}{V_0}, \quad (2)$$

式中：V 为发泡后材料体积，cm^3；V_0 为发泡前材料体积，cm^3。

1.3.3 泡孔结构

泡孔结构与发泡材料的力学性能紧密相关。将发泡材料裁切成薄片，使用 QVP4030A 影像测量仪（广东龙天智能仪器股份有限公司）和 SU1510 扫描电子显微镜（日本株式会社日立制作所）在不同放大倍数下观察发泡材料内部的泡孔结构并采集图像。随即采用 ImageJ 软件从图像中随机选取至少 100 个泡孔，测量其最大直径并计算平均值和标准差，从而绘制泡孔尺寸分布直方图。

1.3.4 水接触角

水接触角可以反映发泡材料表面的疏水性能，对评估发泡材料在高湿度环境下的应用可行性至关重要。使用 JY−82C 接触角测定仪（承德鼎盛试验机检测设备有限公司）对发泡材料进行测试，用以评估发

泡材料表面的疏水性能。

1.3.5 静态压缩性能

静态压缩性能是评估发泡材料作为缓冲包装材料适用性的核心力学指标。按照 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》，使用 Model E43.104 微机控制电子万能试验机（天津意赛德自动化仪器股份有限公司），以 12 mm/min 的速率对发泡材料施加垂直载荷，并设置最大压缩形变为 50%，测试了发泡材料的压缩强度和回弹率。计算公式为

$$\sigma=\frac{P}{A}, \tag{3}$$

式中：σ为发泡材料的压缩强度，MPa；P 为最大压缩载荷，N；A 为发泡材料的承载面积，mm^2。

$$H=\frac{2T_1-T_0}{T_0}, \tag{4}$$

式中：H 为发泡材料的回弹率；T_1 为发泡材料压缩后静置 1 min 时厚度，mm；T_0 为发泡材料压缩前的初始厚度，mm。

1.3.6 粒径分布

采用 Bettersize2600 激光粒度分析仪（丹东百特仪器有限公司）测试咖啡渣的粒径及分布。测试前，先将颗粒样品配制成一定浓度的悬浮液，并超声处理 5~10 min，以确保分散均匀。测试时，将遮光率控制在 10% 左右。采用累积粒径和粒径分布宽度（S）来表征粒径分布特征。计算公式为

$$S=\frac{D_{90}-D_{10}}{D_{50}}, \tag{5}$$

式中，D_{10}、D_{50} 和 D_{90} 分别表示粒径累积分布达到 10%、50% 和 90% 时的粒径值。

1.3.7 分子结构

采用 Nicoletis10 傅里叶变换红外光谱仪（美国赛默飞世尔科技公司）对木薯淀粉、咖啡渣和发泡材料的化学结构进行表征。将干燥后的样品与溴化钾混合并研磨压片，在 500~4000 cm^{-1} 范围内进行扫描，而后通过特征吸收峰分析其分子结构。

1.3.8 黏度

采用 NDJ-8S 旋转黏度计（上海佑科仪器仪表有限公司），选择合适的转子和转速测试预发泡浆料的黏度，并确保扭矩在仪器量程的 10%~90% 之间，通过黏度变化分析助剂添加量对浆料流变性的调控作用。

1.3.9 数据统计分析

所有性能测试均重复 3 次，采用 Origin 软件进行数据处理和统计分析，结果以平均值 ± 标准差表示，并且所有图像中的误差线均代表 3 次平行测试的标准偏差。

2 结果与讨论

2.1 咖啡渣添加量对发泡材料性能的影响

咖啡渣作为生物质增强填料，其添加量会直接影响发泡材料的宏观外貌、微观泡孔结构和综合性能。本研究在瓜尔豆胶、山梨醇和碳酸氢钠的质量分数分别为 0.6%, 10% 和 5% 的条件下，分别制备了咖啡渣质量分数为 10%, 20%, 30%, 40% 和 50% 的发泡材料，以探究咖啡渣添加量对发泡材料的影响。

图 1 展示了不同咖啡渣添加量下发泡材料的外观变化。由图可知，在颜色方面，随着咖啡渣添加量的增加，发泡材料的颜色从黄褐色逐渐加深至黑色，这种变化在引入填料的淀粉基发泡材料中较为常见 [19]。这主要由两方面原因导致：一是咖啡渣自身棕褐色素的直接填充；二是在微波发泡过程中，咖啡渣中的蛋白质与还原糖等组分在高温下发生美拉德反应，生成更多深色物质 [20]。在形状方面，随着咖啡渣质量分数从 10% 增加到 40%，发泡材料的形状逐渐变得规整，底部从凹陷变为平整，说明咖啡渣中的纤维成分可以在发泡过程中作为骨架起到支撑作用，有助于提升发泡材料的尺寸稳定性。但当咖啡渣质量分数超过 40% 后，发泡材料表面出现明显破孔和局部塌陷，这可能是由于过量咖啡渣颗粒发生了团聚，破坏了淀粉基体的连续性，导致发泡材料稳定性下降 [21]。

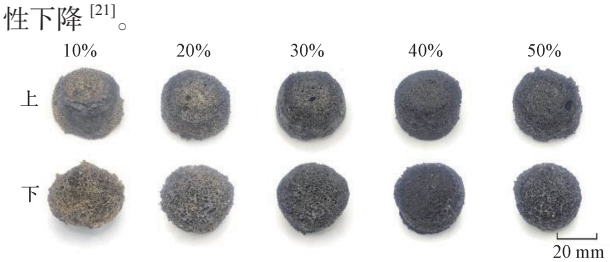


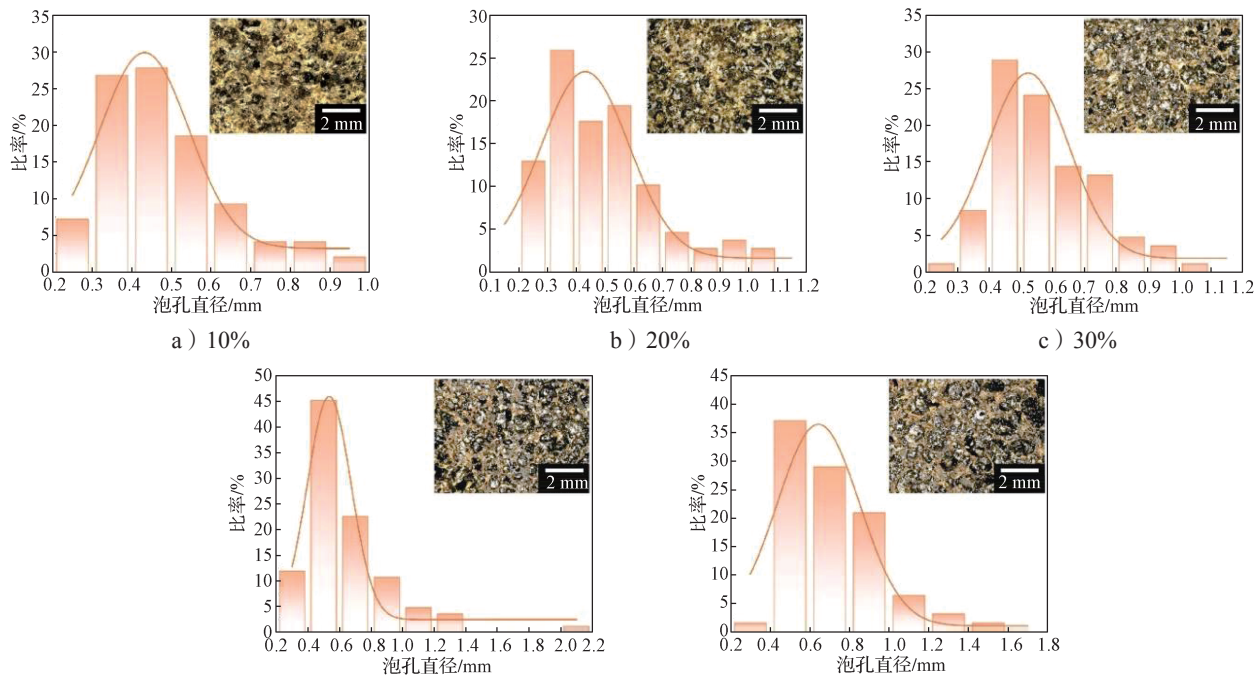
图 1 不同咖啡渣添加量下发泡材料的外观

Fig. 1 Appearance of the foams with different spent coffee grounds contents

图 2 展示了不同咖啡渣添加量对发泡材料泡孔结构的影响。由图可以观察到，当咖啡渣质量分数为 10% 时，发泡材料结构致密，泡孔直径分布在 0.2~1.0 mm 范围内，峰值区间为 0.3~0.5 mm。随着咖啡渣质量分数增加至 30%，发泡材料的泡孔直径集中分布在 0.4~0.6 mm，在泡孔直径增大的同时还保证了一

定的均匀性。这说明咖啡渣不仅可以作为支撑的骨架，还可以作为异相成核剂促进发泡过程中泡孔的均匀成核和生长[22]。但当咖啡渣质量分数超过 40% 后，发泡材料的泡孔直径范围明显增大，甚至出现少量直径超过 2 mm 的大泡孔，这与外观结果一致，进一步证实了过量咖啡渣对发泡材料结构的负面影响。

图 3 展示了不同咖啡渣添加量对发泡材料物理和力学性能的影响。

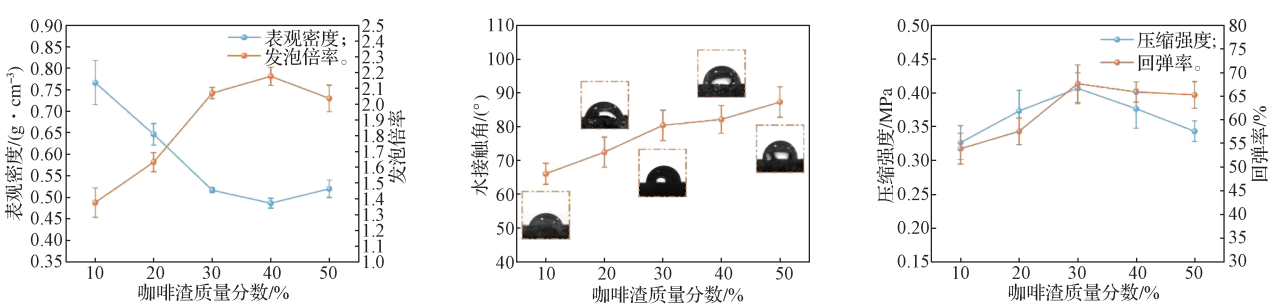


a）10%　b）20%　c）30%

d）40%　e）50%

图 2　不同咖啡渣添加量下发泡材料的泡孔结构与直径分布

Fig. 2　Pore structure and diameter distribution of the foams with different spent coffee grounds contents



a）表观密度和发泡倍率　b）水接触角　c）压缩强度和回弹率

图 3　不同咖啡渣添加量下发泡材料的性能

Fig. 3　Properties of the foams with different spent coffee grounds contents

由图 3a 可知，随着咖啡渣质量分数从 10% 增加到 40%，发泡材料的表观密度从 0.77 g/cm^3 逐渐降低至 0.48 g/cm^3，但当咖啡渣质量分数达到 50% 时却回升至 0.52 g/cm^3。相应地，发泡材料的发泡倍率随着咖啡渣添加量的增加呈现先增加后降低的变化。这是因为适量的咖啡渣可以通过异相成核和骨架支撑来促进发泡，从而形成轻质结构，但过量时会导致结构塌陷，从而使材料变得致密。此外，值得注意的是，咖啡渣添加量过少或过多时，表观密度和发泡倍率的误差较大，而 30% 时误差明显减小，说明适量的咖啡渣有助于提高样品的重复性和稳定性。由图 3b 可知，发泡材料的表面水接触角随着咖啡渣添加量的增加呈现单调上升趋势，从 66.05° 增大至接近疏水状态的 87.31°，这是由咖啡渣表面固有的疏水油脂层和微观粗糙结构导致的[23]。由图 3c 可知，在力学性能方面，发泡材料的压缩强度和回弹率均随着咖啡渣添加

量的增加呈现先上升后下降的趋势，并在质量分数为30% 时达到峰值，分别为 0.41 MPa 和 67.65%。这说明适量的咖啡渣与基体相容性良好，从而提升泡孔壁的强度和弹性恢复能力。然而，当咖啡渣过量时，其分散性变差，容易形成团聚体，引起发泡材料内部缺陷和结构坍塌，最终导致发泡材料性能下降 [24]。

综合而言，在本研究体系中，添加 30% 咖啡渣可以发挥增强骨架的作用，并减少其对泡孔结构的负面影响，使发泡材料具有更优异的综合性能。

2.2 瓜尔豆胶添加量对发泡材料性能的影响

瓜尔豆胶作为一种具有良好水溶性和增稠性的天然多糖，可作为发泡材料的增强剂和稳定剂。本研究在咖啡渣、山梨醇和碳酸氢钠的质量分数分别为 30%, 10% 和 5% 的条件下，制备了瓜尔豆胶质量分数分别为 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% 和 1.0% 的发泡材料，以探究瓜尔豆胶添加量对发泡材料性能的影响。

图 4 展示了不同瓜尔豆胶添加量下发泡材料的外观变化。由图可知，随着瓜尔豆胶添加量的增加，发泡材料的颜色几乎没有变化，但底部逐渐从凹陷变为平整，表面泡孔也逐渐变得细密，说明瓜尔豆胶有助于改善发泡材料的尺寸稳定性。但当瓜尔豆胶质量分数达到 1.0% 时，发泡材料变得扁平并且表面出现轻微凹陷，说明此时瓜尔豆胶已经过量，对发泡材料产生了负面影响。

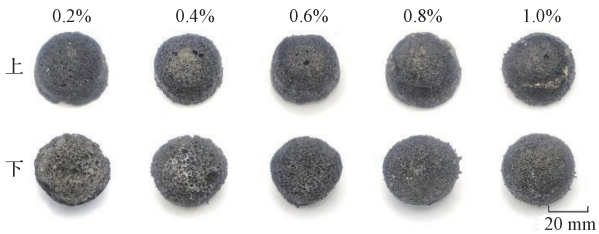
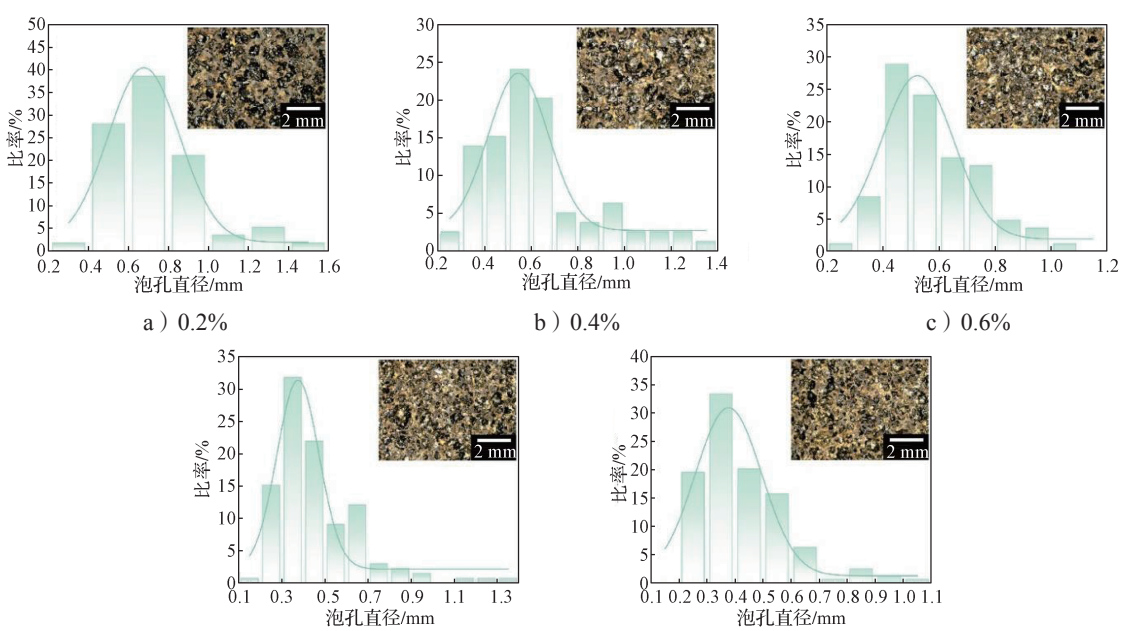


图 4 不同瓜尔豆胶添加量下发泡材料的外观

Fig. 4 Appearance of the foams with different guar gum contents

图 5 展示了不同瓜尔豆胶添加量对发泡材料泡孔结构的影响。从图中可以明显看出，在不同瓜尔豆胶添加量下，发泡材料的泡孔结构发生了明显变化。随着瓜尔豆胶添加量的增加，发泡材料的泡孔直径逐渐减小，分布范围从 0.2~1.6 mm 缩小至 0.2~1.1 mm，但泡孔分布较为均匀。这是因为富含羟基的瓜尔豆胶可以与淀粉发生氢键结合和分子链缠结，增强淀粉基体的熔体强度并提高预发泡浆料的黏度，从而在发泡过程中能有效包裹住气泡，防止气泡过分膨胀后发生合并或破裂，进而促进形成均匀细密的泡孔结构 [25]。但是当瓜尔豆胶过量时，过高的浆料黏度会阻碍气泡成核和膨胀，难以形成理想的泡孔结构。

图 6 展示了不同瓜尔豆胶添加量对发泡材料物理和力学性能的影响。

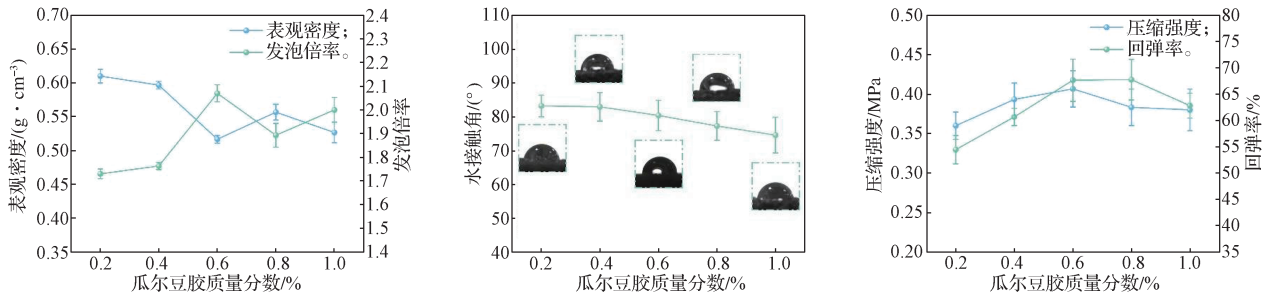


a）0.2%　b）0.4%　c）0.6%

d）0.8%　e）1.0%

图 5 不同瓜尔豆胶添加量下发泡材料的泡孔结构与直径分布

Fig. 5 Pore structure and diameter distribution of the foams with different guar gum contents



a）表观密度和发泡倍率　b）水接触角　c）压缩强度和回弹率

图 6　不同瓜尔豆胶添加量下发泡材料的性能

Fig. 6　Properties of the foams with different guar gum contents

由图 6a 可知，随着瓜尔豆胶添加量的增加，发泡材料的表观密度呈现先降低后升高的变化趋势，并在质量分数为 0.6% 时达到峰值 0.51 g/cm^3；其发泡倍率也同样在此时达到峰值 2.07。这进一步证实了适量的瓜尔豆胶有利于形成和稳定泡孔结构，从而改善发泡材料的轻质性，但过量时会让泡孔结构过于紧凑。此外，瓜尔豆胶质量分数超过 0.6% 后，发泡材料表观密度误差棒有所增大，说明过量的瓜尔豆胶反而会导致发泡过程稳定性下降，从而使样品间差异增大。由图 6b 可知，由于瓜尔豆胶本身具有强亲水性，随着其添加量的增加，发泡材料的表面水接触角从 83.25° 逐渐减小至 74.61° [26]。由图 6c 可知，在力学性能方面，发泡材料的压缩强度和回弹率均随着瓜尔豆胶添加量的增加呈现出先升高后降低的趋势，并在 0.6% 时达到峰值。这归因于瓜尔豆胶与淀粉基体可以形成三维网络结构，有效增强泡孔壁的强度，从而提高发泡材料的力学性能，但过量时会干扰淀粉的发泡过程 [27]。

综合而言，瓜尔豆胶作为增强剂和稳定剂，可以通过调节浆料流变性和泡孔尺寸，进而影响材料的泡孔结构和力学性能。在本研究体系中，瓜尔豆胶质量分数为 0.6% 时可以制备出具有优良泡孔结构和优异综合性能的发泡材料。

2.3　碳酸氢钠添加量对发泡材料性能的影响

碳酸氢钠作为常用的化学发泡剂，在受热时可以分解产生二氧化碳气体，为形成发泡结构提供直接动力 [28]。本研究在咖啡渣、瓜尔豆胶和山梨醇的质量分数分别为 30%, 0.6% 和 10% 的条件下，分别制备了碳酸氢钠质量分数为 1%, 3%, 5%, 7%, 9% 的发泡材料，以探究碳酸氢钠添加量对发泡材料性能的影响。

图 7 展示了不同碳酸氢钠添加量下发泡材料的外观变化。由图可知，随着碳酸氢钠添加量的增加，发泡材料的形状逐渐变得规整，底部从凹陷变得平整，说明发泡动力的增强可以使发泡过程中气泡充分膨胀，从而有利于支撑发泡材料的形状。然而，当碳酸氢钠质量分数增加至 7% 后，发泡材料的表面出现多个明显的破孔并发生局部塌陷，这是由于过强的发泡动力可能超过淀粉基体的承受极限，导致气泡破裂和合并，泡孔结构随之塌陷 [29]。

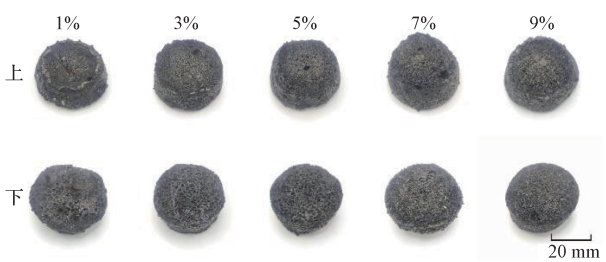


图 7　不同碳酸氢钠添加量下发泡材料的外观

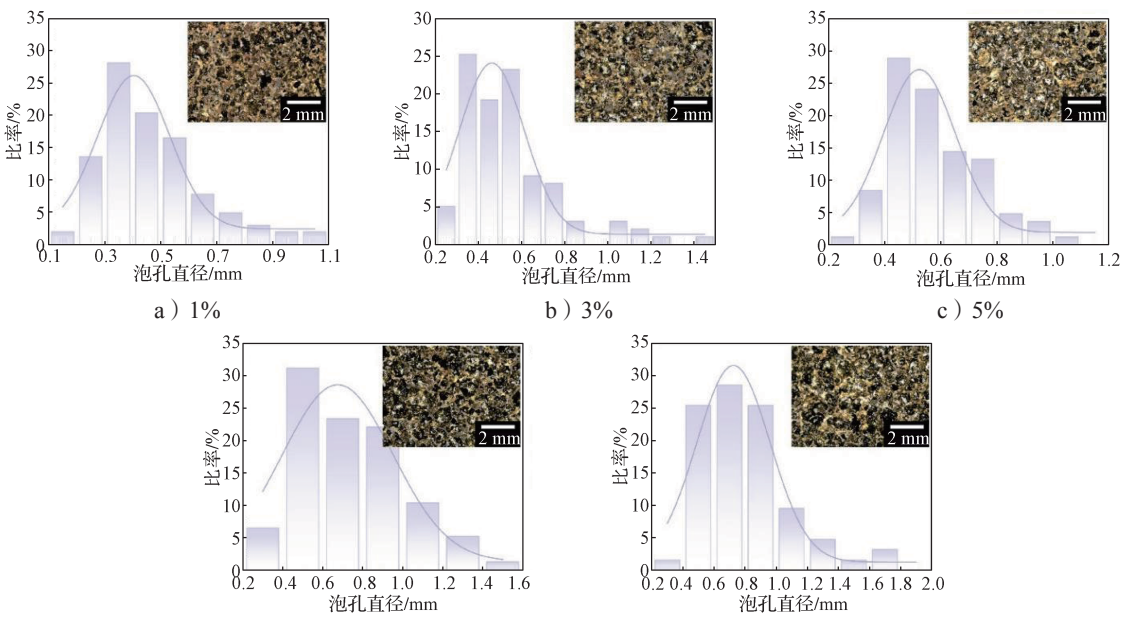
Fig. 7　Appearance of the foams with different sodium bicarbonate contents

图 8 进一步揭示了不同碳酸氢钠添加量对发泡材料泡孔结构的影响。由图可知，随着碳酸氢钠添加量的增加，发泡材料的泡孔直径逐渐增大，集中分布范围从 0.3~0.6 mm 增大至 0.4~1.0 mm，证实了更强的发泡动力有助于形成更为均匀和开放的泡孔结构 [30]。然而，当碳酸氢钠质量分数超过 7% 后，泡孔直径范围继续增大，并出现少数直径超过 1.6 mm 的大泡孔，进一步证实了发泡材料的局部塌陷正是由于泡孔在过量的气体推动下发生了合并和破裂。

图 9 展示了不同碳酸氢钠添加量对发泡材料物理和力学性能的影响。由图 9a 可知，随着碳酸氢钠添加量的增加，发泡材料的表观密度呈现先降低后升高的趋势，在质量分数为 5% 时达到最低，为 0.51 g/cm^3；发泡材料的发泡倍率也随之呈现先升高后降低的趋势。这说明碳酸氢钠能有效促进气泡膨胀，实现发泡材料的轻质化，但要避免过量时导致相反结果。

此外，各添加量下发泡材料表观密度的误差均较大，说明碳酸氢钠作为发泡剂对发泡过程稳定性的影响较大。由图 9b 可知，发泡材料的表面水接触角逐渐降低，这是由于碳酸氢钠的增加使发泡材料表面的泡孔增多增大，使其更易于与水分接触。由图 9c 可知，随着碳酸氢钠添加量的增加，发泡材料的压缩强度也由于整体结构变得疏松而逐渐降低；与之不同，发泡材料的回弹率却呈现出先升高后降低的趋势，并在碳酸氢钠质量分数为 5% 时达到最高值。这说明适量的碳酸氢钠可以使发泡过程中的气体生成量和熔体黏弹性达到良好平衡，有助于分散咖啡渣颗粒并促进形成细密均匀的泡孔结构，从而赋予发泡材料更优异的回弹性。但当碳酸氢钠过量时，结构塌陷和泡孔破裂会明显影响发泡材料的回弹性。

综合而言，碳酸氢钠作为发泡剂是调控泡孔尺寸和分布的核心因素。在本研究体系中，当碳酸氢钠添加量为 5% 时，可以实现发泡材料密度、压缩强度和回弹率等性能之间的平衡。

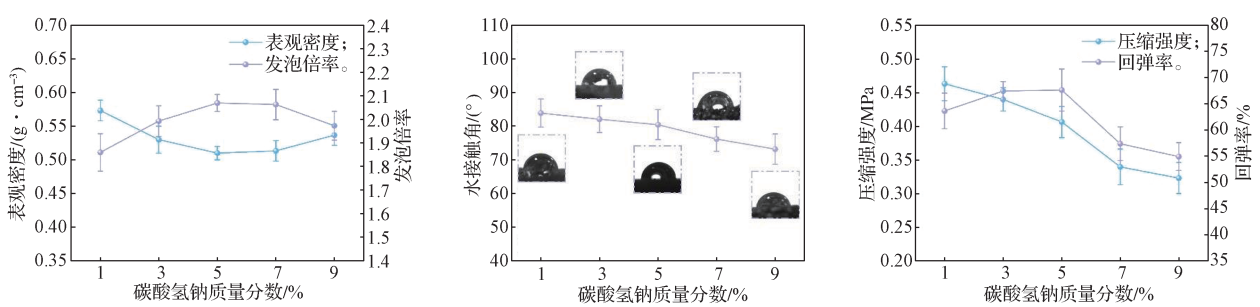


a）1%　b）3%　c）5%

d）7%　e）9%

图 8　不同碳酸氢钠添加量下发泡材料的泡孔结构与直径分布

Fig. 8　Pore structure and diameter distribution of the foams with different sodium bicarbonate contents



a）表观密度和发泡倍率　b）水接触角　c）压缩强度和回弹率

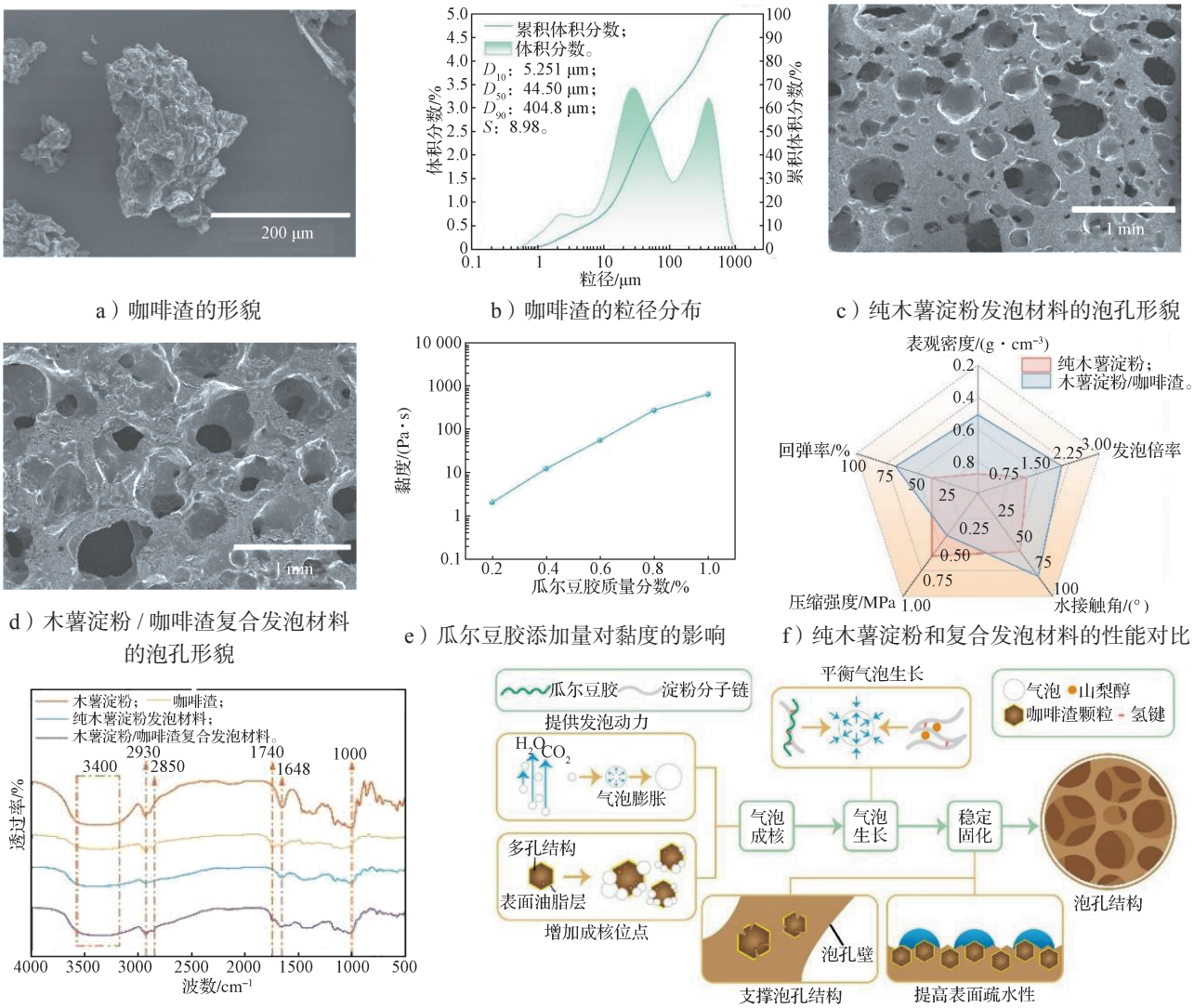
图 9　不同碳酸氢钠添加量下发泡材料的性能

Fig. 9　Properties of the foams with different sodium bicarbonate contents

2.4　复合发泡材料的性能验证与发泡机制分析

基于单因素试验确定的最优配方（咖啡渣 30%，瓜尔豆胶 0.6% 和碳酸氢钠 5%），本研究将木薯淀粉 / 咖啡渣复合发泡材料与纯木薯淀粉发泡材料进行综合性能对比，并进一步探究其发泡机制，结果如图 10 所示。

由图 10a 可知，咖啡渣颗粒表面呈粗糙多孔的不规则形状，有利于其与淀粉基质形成机械互锁结构 [20]。由图 10b 可知，咖啡渣的粒径分布较宽，主要在 1~1000 μm 之间，中位粒径达到 44.50 μm，为



a）咖啡渣的形貌　b）咖啡渣的粒径分布　c）纯木薯淀粉发泡材料的泡孔形貌

d）木薯淀粉 / 咖啡渣复合发泡材料的泡孔形貌　e）瓜尔豆胶添加量对黏度的影响　f）纯木薯淀粉和复合发泡材料的性能对比

g）红外光谱图　h）复合发泡材料的发泡机制

图 10　复合发泡材料的结构表征与形成机制

Fig. 10　Structural characterization and formation mechanisms of foams

其作为异相成核剂提供了尺寸基础。图 10c~d 展现了木薯淀粉 / 咖啡渣复合发泡材料与纯淀粉发泡材料之间明显的泡孔结构差异。纯木薯淀粉发泡材料的泡孔壁厚且光滑，泡孔分布疏松且孔径很小。与之相比，木薯淀粉 / 咖啡渣复合发泡材料的泡孔壁更薄更粗糙，孔径增大至 0.3~0.7 mm，说明咖啡渣镶嵌于泡孔壁中，有效发挥了成核剂和骨架支撑的作用，有利于形成更加开放的三维多孔结构。

图 10e 的黏度测试展现了瓜尔豆胶对预发泡浆料黏弹性的调控作用。随着瓜尔豆胶添加量的增加，预发泡浆料的黏度呈指数级增长，并且在质量分数为 0.6% 时达到 55.691 Pa·s，能够为气泡生长提供适宜的黏弹性环境，从而有助于复合发泡材料形成稳定细密的泡孔结构 [26]。

图 10f 展现了多种作用下两种发泡材料在宏观性能上的差异。与纯淀粉发泡材料相比，木薯淀粉 / 咖啡渣复合发泡材料的表观密度降低 42%，发泡倍率提升 71%，进一步证实了咖啡渣的成核和支撑作用；其水接触角的提升不仅得益于咖啡渣表面的疏水油脂层，还归因于咖啡渣在淀粉基质中形成的微观粗糙结构；此外，木薯淀粉 / 咖啡渣复合发泡材料还实现了压缩强度和回弹率之间的良好平衡，具有优异的弹性和韧性 [31]。从微观结构上分析，由图 10g 可知，纯木薯淀粉发泡材料的整体峰形与木薯淀粉相似，但 3400 cm^{-1} 附近的羟基峰发生弱化和宽化，这可能是由于木薯淀粉在发泡过程中的糊化和淀粉与瓜尔

豆胶之间的氢键结合[32]。木薯淀粉 / 咖啡渣复合发泡材料则结合了木薯淀粉和咖啡渣的峰形特征，说明咖啡渣被成功引入并在淀粉基质中稳定存在。此外，其羟基峰发生宽化并向低波数偏移，说明木薯淀粉和咖啡渣之间形成了氢键相互作用，有利于增强界面相容性。

综上所述，按照最优配方制备的木薯淀粉 / 咖啡渣复合发泡材料相比纯淀粉发泡材料实现了轻质化、疏水性和回弹性的全面提升。

基于上述对比和分析，木薯淀粉 / 咖啡渣复合发泡材料的发泡机制（见图 10h）可分为气泡成核、气泡生长和稳定固化 3 个阶段。在气泡成核阶段，微波作用下体系中的水分迅速汽化，同时碳酸氢钠受热分解释放二氧化碳气体，两者共同提供气泡成核和膨胀的核心动力[30]。此外，具有多孔结构的咖啡渣颗粒作为异相成核剂提供了大量成核位点，进一步促进形成细密均匀的泡孔结构。在气泡生长阶段，瓜尔豆胶和淀粉发生氢键结合和分子链缠结，同时山梨醇插入淀粉分子链之间，共同调控淀粉基体的黏弹性，使气泡能够稳定生长至理想尺寸，防止气泡合并和破裂。在稳定固化阶段，咖啡渣颗粒镶嵌在泡孔壁中，和淀粉基体形成氢键结合和机械互锁结构，起到骨架支撑作用，在固化过程中有效防止泡孔坍塌[20]。此外，咖啡渣的疏水成分还可以提高发泡材料的表面疏水性能，有助于克服淀粉基发泡材料耐水性差的缺陷[33]。

3 结论

本研究以废弃咖啡渣为增强填料、木薯淀粉为基质，通过微波发泡工艺成功制备了可生物降解的木薯淀粉 / 咖啡渣复合发泡材料，系统探究了咖啡渣、瓜尔豆胶和碳酸氢钠添加量对发泡材料结构和性能的影响，并确定了最佳配比，得到主要结论如下：

1）咖啡渣作为淀粉基发泡材料的填料可以发挥多重作用。作为异相成核剂，咖啡渣凭借其多孔结构促进气泡成核。作为增强填料，咖啡渣可以和淀粉基体形成机械互锁结构，起到支撑作用。此外，咖啡渣中的疏水成分有助于提升发泡材料的疏水性能。

2）功能助剂对调控发泡材料的结构与性能至关重要。瓜尔豆胶通过氢键结合和分子链缠结增强熔体强度，有助于稳定泡孔结构。碳酸氢钠作为发泡剂提供核心发泡动力，直接影响泡孔尺寸及分布。添加适量的助剂可显著改善发泡材料的泡孔结构。

3）最优配方确定和发泡机制分析。确定咖啡渣、瓜尔豆胶和碳酸氢钠的最佳质量分数分别为 30%, 0.6% 和 5%，以此制备的发泡材料相比纯木薯淀粉发泡材料展现出优异的综合性能：表观密度 0.51 g/cm^3，发泡倍率 2.07，水接触角 80.42°，压缩强度 0.41 MPa，回弹率 67.65%。此外，其发泡机制可分为气泡成核、气泡生长和稳定固化 3 个阶段。

木薯淀粉 / 咖啡渣复合发泡材料具备原料可再生和可生物降解的核心优势，在一次性缓冲包装、可降解食品容器和农业育苗杯等对力学性能要求适中但对环保性要求较高的使用场景展现出应用潜力。然而，这种发泡材料相比传统石油基泡沫仍然存在明显差距，后续可从优化微波发泡工艺、对原料进行改性等方面进一步提升材料的发泡性能、耐水性能和力学性能，并实现对泡孔结构的更精确调控。

参考文献：

[1] TAPIA-BLÁCIDO D R，AGUILAR G J，DE ANDRADE M T，et al. Trends and Challenges of Starch-Based Foams for Use as Food Packaging and Food Container[J]. Trends in Food Science & Technology，2022，119：257–271.

[2] 黄品歌，张 艳，孟 毅，等 . 生物质基天然纤维包装材料的研究现状及发展趋势 [J]. 包装学报，2022，14(5)：66–74.

[3] WANG X H，JANG J，SU Y Q，et al. Starting Materials, Processes and Characteristics of Bio-Based Foams: A Review[J]. Journal of Bioresources and Bioproducts，2024，9(2)：160–173.

[4] PENG S X，LI F Y，MAN J，et al. Enhancing the Properties of Starch-Fiber Foaming Material by Adjusting Fiber Length: The Synergistic Effect of Macro-Micro Stress Conduction[J]. Materials Today Communications，2022，33：104408.

[5] ZHANG Y，LI Z H，BAO X Y，et al. Evaluating How Citrus Fiber Affects the Cell Structure and Functions of Starch-Based Foam[J]. Industrial Crops and Products，2024，218：118984.

[6] MACHADO C M，BENELLI P，TESSARO I C. Study of Interactions Between Cassava Starch and Peanut Skin on Biodegradable Foams[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2020，147：1343–1353.

[7] AGUILAR G J，TAPIA-BLÁCIDO D R. Evaluating How Avocado Residue Addition Affects the Properties

of Cassava Starch-Based Foam Trays[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2023，240：124348.

[8] AGUILAR G J，FERREIRA DA SILVA Y，AUGUSTO P E D，et al. Morphological, Structural, and Functional Properties of Biobased Cassava Starch Foam Trays Added with Turmeric Pigment Extraction Residue[J]. Journal of Cleaner Production，2025，515：145827.

[9] YUSUFOĞLU B，KEZER G，WANG Y F，et al. Bio-Recycling of Spent Coffee Grounds: Recent Advances and Potential Applications[J]. Current Opinion in Food Science，2024，55：101111.

[10] SINGH T A，PAL N，SHARMA P，et al. Spent Coffee Ground: Transformation from Environmental Burden into Valuable Bioactive Metabolites[J]. Reviews in Environmental Science and Bio，2023，22(4)：887−898.

[11] MUHAMMAD S，BAIRWAN R D，KHALIL H P S A，et al. Comparative Study of Lignin from Patchouli Waste Fibers and Spent Coffee Grounds as Biofillers in Poly(3-Hydroxybutyrate-co-3-Hydroxyvalerate)-Based Biodegradable Packaging Materials[J]. Bioresource Technology Reports，2025，30：102138.

[12] 郑进宝，李　琛 . 淀粉基发泡材料制备及性能优化研究进展 [J]. 精细化工，2022，39(8)：1513−1524，1557.

[13] 蔡举艳，苏　琼，王彦斌，等 . 可生物降解泡沫材料的研究进展 [J]. 化工进展，2023，42(3)：1457−1470.

[14] 曹延芬，卫灵君，孙　昊，等 . 新型废纸发泡材料的制备及其力学性能 [J]. 材料科学与工程学报，2020，38(5)：822−830.

[15] 李祥刚，李　辉，阳志强，等 . 淀粉 /PVA 复合发泡材料的制备及其性能研究 [J]. 包装学报，2020，12(5)：35−44.

[16] 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.

[17] GEORGES A，LACOSTE C，DAMIEN E. Effect of Formulation and Process on the Extrudability of Starch-Based Foam Cushions[J]. Industrial Crops and Products，2018，115：306−314.

[18] VERSINO F，LÓPEZ O V，GARCÍA M A. Sunflower Oil Industry By-Product as Natural Filler of Biocomposite Foams for Packaging Applications[J]. Journal of Polymers and the Environment，2021，29(6)：1869−1879.

[19] KOESTER D L，GOMES L M，DRESCH A P，et al. Biodegradable Starch Foams Reinforced by Food-Chain Side Streams[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2024，275：133386.

[20] ALI A MAJRASHI M，BAIRWAN R D，MUSHTAQ R Y，et al. Novel Enhancement of Interfacial Interaction and Properties in Biodegradable Polymer Composites Using Green Chemically Treated Spent Coffee Ground Microfiller[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2024，266：131333.

[21] 耿　雪，马　驰，纪汉锋，等 . 咖啡渣改性聚氨酯基阻尼复合材料的制备与性能 [J]. 精细化工，2025，42(4)：795−803.

[22] ZHAO N，LIU Z Y，YU T，et al. Spent Coffee Grounds: Present and Future of Environmentally Friendly Applications on Industries: A Review[J]. Trends in Food Science & Technology，2024，143：104312.

[23] 孙圣鸿，李　圣，陈伊玉，等 . 硅烷改性咖啡渣 / PLA 复合材料的研究与 3D 打印应用 [J]. 数字印刷，2022(6)：102−108，127.

[24] 苏柳月，何　其，谭春雷，等 . 蔗渣纤维对水泥基复合材料性能的影响 [J]. 材料科学与工程学报，2023，41(2)：276−281.

[25] 李　远，辛士刚，赵秀红，等 . 瓜尔豆胶对马铃薯淀粉消化性和糊化特性的影响 [J]. 食品工业科技，2019，40(8)：61−65，72.

[26] 刘　静，段春月，刘　畅 . 瓜尔豆胶和黄原胶对淀粉理化性质的影响 [J]. 食品工业，2021，42(2)：205−210.

[27] 蔡　磊，冯　蕾，徐亚元，等 . 瓜尔豆胶对紫薯凝胶 3D 打印特性的影响 [J]. 食品工业科技，2023，44(21)：10−17.

[28] QUILEZ-MOLINA A I，LE MEINS J F，CHARRIER B，et al. Starch-Fibers Composites, a Study of All-Polysaccharide Foams from Microwave Foaming to Biodegradation[J]. Carbohydrate Polymers，2024，328：121743.

[29] 曾广胜，梁　洁，江太君，等 . 淀粉基热塑性发泡材料的配方研究 [J]. 包装学报，2019，11(2)：59−65.

[30] 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.

[31] 石　勇，刘奇龙，金澳威，等 . 改性可发性聚苯乙烯共混发泡材料缓冲性能研究 [J]. 包装学报，2025，17(1)：88−93.

[32] 栾茜玉，陈　妍，张一秀，等 . 海藻酸钠与刺槐豆胶协同作用对绿豆淀粉的短期和长期老化影响 [J]. 粮油食品科技，2024，32(4)：112−120.

[33] CERVERA-MATA A，ARANDA V，ONTIVEROS-ORTEGA A，et al. Hydrophobicity and Surface Free Energy to Assess Spent Coffee Grounds as Soil Amendment. Relationships with Soil Quality[J]. Catena，2021，196：104826.

（责任编辑：李玉华）

Performance Optimization of Cassava Starch/Spent Coffee Grounds Composite Foams

ZHANG Wanlu[1], WU Shuang[1], WANG Lihong[1], WEI Lingjun[1], SUN Hao[1,2], DU Tiantian[1]

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Food Advanced Manufacturing Equipment Technology, School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China; 2. Tsinghua Suzhou Environmental Innovation Research Institute, Suzhou Jiangsu 215000, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor mechanical properties and water resistance of pure starch-based foaming materials, composite foams were prepared via microwave foaming with cassava starch as the matrix and spent coffee grounds as fibrous filler. The effects of the amount of three key components, namely spent coffee grounds, guar gum and sodium bicarbonate on the apparent density, expansion ratio, microstructure, hydrophobicity and mechanical properties of the foams were systematically investigated to optimize the overall performance. The results show that spent coffee grounds can act as heterogeneous nucleating agents and supporting frameworks, while guar gum and sodium bicarbonate can enhance the viscoelasticity of the slurry and provide foaming power, respectively. When the contents of the three components were 30%, 0.6% and 5%, respectively, the foam exhibited a relatively uniform and fine pore structure. Under these conditions, the apparent density was 0.51 g/cm^3, the expansion ratio was 2.07, and the water contact angle reached 80.42° , while the compressive strength (at 50% strain) was 0.41 MPa and the resilience was 67.65%. Through formulation optimization, a cassava starch/spent coffee grounds composite foam with excellent overall performance was developed, offering an effective approach for the resource utilization of food waste such as spent coffee grounds.

Keywords: bio-based foam; cassava starch; spent coffee grounds; microwave foaming

(上接第 60 页)

Design of an Elderly-Oriented Smart Medicine Box from a Multimodal Perspective

CHEN Wanting, TANG Zirong, HE Xia

(School of Art and Design, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 311100, China)

Abstract: For the problems such as sensory decline, memory deterioration, and cognitive impairment faced by elderly, particularly empty-nest seniors during medication taking process, through user journey mapping and grounded theory analysis, the key demands in their medication process are identified and refined, leading to the development of a three-dimensional demand model encompassing functional, cognitive, and emotional dimensions. Based on this model, a four-layer system architecture is constructed, and a smart medicine box utilizing multimodal interaction technology is designed. By integrating the multimodal hardware sensing and redundant output mechanism, the system effectively reduces operational errors among elderly users and enhances elderly-friendly performance. Meanwhile, the emotionally oriented interaction design of the family collaboration module strengthens users' willingness to engage, thereby forming a closed-loop service system. The findings demonstrate that multimodal interaction can significantly improve medication management for the elderly, offering a design reference that balances technological practicality and humanistic care in elderly-friendly product development.

Keywords: multimodal interaction; elderly-oriented design; smart medicine box; medication adherence; generative artificial intelligence