

杂色蛤中空盐粒的制备与品质评价

李美焕¹, 李库², 郭辉², 沈硕², 陈庭家³, 赵起越¹, 汪宣鹏¹, 陈嘉腾¹, 徐献兵^{1*}

(1. 大连工业大学食品学院, 国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁大连 116034)

(2. 酵母功能湖北省重点实验室, 湖北宜昌 443003) (3. 大连盐化集团有限公司, 辽宁大连 116309)

摘要: 为了解决传统食盐及中空盐粉存在的流动性不佳、溶解效率低下以及吸湿团聚倾向等技术瓶颈, 同时突破传统水系润湿剂造粒技术对盐粒中空结构完整性的制约难题, 本研究基于无水乙醇湿法造粒技术, 成功制备了具有稳定中空结构的盐颗粒。通过密度测定、动态电导率监测及恒湿加速试验系统表征其物理性能, 结合电子鼻与感官评价体系解析其风味轮廓与感官特性。结果表明: 与中空盐粉相比, 中空盐粒的堆积密度和振实密度分别提升 23.63% 和 8.11%, 压缩度与休止角降低 36.98% 和 47.32%, 吸湿率降低 20.77%。与普通盐粒相比, 中空盐粒溶解速率提升 64.71%, 咸味峰值强度与释放速率的感官评分分别提高 36.72% 和 31.01%。中空盐粒通过增大比表面积与优化界面形态, 实现了溶解动力学优化与水相阻隔功能的协同增效。其结构特性精准平衡了咸味瞬时释放与持久感知, 为低钠盐、风味载体盐等特种功能食盐的开发提供了新策略。

关键词: 酶解粉; 中空盐; 湿法造粒; 性能优化; 减盐

文章编号: 1673-9078(2026)05-175-183

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.5.0371

Preparation and Quality Evaluation of Hollow Salt Particles from
Ruditapes philippinarum

LI Meihuan¹, LI Ku², GUO Hui², SHEN Shuo², CHEN Tingjia³, ZHAO Qiyue¹, WANG Xuanpeng¹,
CHEN Jiateng¹, XU Xianbing^{1*}

(1.National Engineering Research Center of Seafood, School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)(2.Hubei Provincial Key Laboratory of Yeast Function, Yichang 443003, China)
(3.Dalian Salt Chemical Group Co. Ltd., Dalian 116309, China)

Abstract: To overcome the limitations of traditional table salt and hollow salt powders, including poor flowability, low dissolution efficiency, and susceptibility to hygroscopic agglomeration, and to address the structural instability of hollow cores associated with conventional aqueous wet granulation, an anhydrous ethanol-based wet granulation method was developed to prepare hollow salt particles with stable internal structures. The physical properties of the hollow salt particles were systematically characterized by density measurements, dynamic conductivity analysis, and accelerated hygroscopicity testing under controlled humidity conditions. In addition, flavor characteristics and sensory attributes were evaluated using an electronic nose system and a standardized sensory evaluation method. Results showed that, compared with hollow salt powder, the bulk density and tapped

引文格式:

李美焕,李库,郭辉,等.杂色蛤中空盐粒的制备与品质评价[J].现代食品科技,2026,42(5):175-183.

LI Meihuan, LI Ku, GUO Hui, et al. Preparation and quality evaluation of hollow salt particles from *Ruditapes philippinarum* [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(5): 175-183.

收稿日期: 2025-03-16 ; 修回日期: 2025-05-02 ; 接受日期: 2025-05-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD2100200); 安琪酵母股份有限公司校企合作项目 (2023396)

作者简介: 李美焕 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品风味化学, E-mail: lmh0403@163.com

通讯作者: 徐献兵 (1986-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品风味化学、食品胶体与界面化学、仿生微纳器件与感知科学, E-mail: xianbingxu@dlpu.edu.cn

density of the hollow salt particles increased by 23.63% and 8.11%, respectively, while compressibility and angle of repose decreased by 36.98% and 47.32%, respectively. Hygroscopicity was reduced by 20.77%. Compared with conventional salt particles, the dissolution rate of the hollow salt particles increased by 64.71%, and sensory scores for peak saltiness intensity and salt release rate increased by 36.72% and 31.01%, respectively. The enhanced dissolution kinetics and moisture resistance were attributed to an increased specific surface area and optimized interfacial morphology of the hollow structure. The hollow salt particles achieved a favorable balance between rapid saltiness release and sustained flavor perception, demonstrating their potential for use in specialty functional salts, including low-sodium salt and flavor carrier salt formulations.

Key words: enzymatic powder; hollow salt particles; wet granulation; performance optimization; salt reduction

食盐作为维持人体生理功能的重要电解质与饮食中不可或缺的基础调味品,其过量摄入食盐与高血压、心血管疾病等多种慢性疾病的发生密切相关^[1,2]。随着《“健康中国 2030”规划纲要》战略的推进和居民健康意识的提升,“减盐不减咸”的理念日益受到重视^[3]。传统食盐存在颗粒尺寸大、溶解速率低、咸味感知低且慢等物理性能和感官特性共性缺陷,限制其在食品加工中的应用效果^[4]。食品科技领域正通过多维度创新探索减盐方法,通过技术创新减少食盐用量的同时保持味蕾的咸味感知成为当下的研究热点^[5]。中空盐作为一种通过结构设计优化咸味感知的新型盐制品,通过构建具有高比表面积的中空微球结构,可保持风味完整性的同时将盐含量降低 25%~50%^[6]。

目前,中空盐的制备面临原料适用性与工艺复杂性的挑战,多数方法依赖繁琐的制备流程,限制了其工业化应用^[7]。基于此,本研究采用食品级酶解粉为原料构建中空盐载体,其中杂色蛤酶解粉展现出独特优势。杂色蛤作为我国年产量突破 438 万 t 的重要经济性贝类,具有个体规格小、组织质地柔软的物理特性,便于高效预处理与规模化加工,为工业化生产提供了稳定的原料保障。其酶解产物通过生物酶解-喷雾干燥技术制备,富含多种呈味物质与营养成分,因其低分子量、高亲水性的理化特性,是构建功能性盐载体的理想原料^[8]。前期研究表明,杂色蛤中空盐粉表面钠元素和氯元素含量相比普通食盐显著降低,溶解性显著提升,中空结构显著增大了盐颗粒与味蕾的接触面积,有效提升了咸味感知和咸味冲击感^[9]。然而,在后续的应用测试和储存实验中发现,中空盐粉存在若干亟待解决的技术瓶颈。首先,中空盐粉末在开放环境下易受空气动力学影响而产生扬尘现象,不仅造成原料损耗,还会破坏环境^[10]。其次,粉末具有更大的比表面积,更易吸附环境中的水分,在贮藏过程中,易结成较大盐块^[11]。此外,由于中空盐粉的尺寸小和静电作用增加了粉体间的摩擦力和阻力,使粉体流动性进一步降低,直接影响产品的风味一致性和使用便

利性^[12]。因此有必要对中空盐粉进行造粒处理来改善性能,传统造粒工艺中,水系润湿剂因水的强极性及高溶解性,易与盐粉发生溶剂化作用,导致中空盐颗粒在润湿过程中发生部分溶解或结构变形,最终形成实心或半中空颗粒,削弱减盐效果。

本研究通过造粒工艺优化其物理形态,解决粉体特性带来的应用限制,开发了无水乙醇湿法旋转造粒技术。该技术采用可控的湿法造粒工艺,在严格保持中空结构完整性的前提下,成功实现了中空盐粉向中空盐粒的形态转变。通过系统的表征分析,对比研究了中空盐粒与普通盐粒、实心盐粉、中空盐粉和实心盐粒的性能差异,造粒处理后样品维持原有中空结构的同时其流动性、吸湿性、抗吸湿性及风味感知均得到显著改善。这一创新性造粒方案的成功实施,为未来开发更多基于结构调控的减钠型调味品奠定了重要的理论和实践基础,对推动健康食品产业的技术进步具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 材料

杂色蛤肉,丹东市正润食品有限公司;酸性蛋白酶、复合蛋白酶,无锡怡竹生物有限公司;盐酸、氢氧化钠,国药集团化学试剂有限公司;食品级氯化钠,大连盐化集团;无水乙醇,河南汉永酒精有限公司;聚甘油脂肪酸酯,河南万邦化工科技有限公司;酵母抽提物,安琪酵母股份有限公司;助干剂,山东西王糖业有限公司。

1.2 主要仪器设备

LY-280 型匀浆机,中山市东凤镇隆粤电器厂;PHS-3 型精密 pH 计,上海雷磁仪器厂;76-1A 型一体式玻璃恒温水浴,常州朗越仪器制造有限公司;YC-1800 型喷雾干燥机,上海雅程仪器设备有限公司;JZL-80 型挤压造粒机,常州市永昌制粒干燥设备有限

公司; DHG-9070A 型电热鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; Zeiss Merlin Compact 型扫描电镜, 德国卡尔蔡司公司; PEN33 型电子鼻, 德国 Airsense 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 中空盐粒的制备

杂色蛤酶解粉的制备: 将杂色蛤肉与超纯水料液比 1:4 匀浆至无明显颗粒, $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸调节体系 pH 值为 3, 加入 $8000 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ (杂色蛤肉) 酸性蛋白酶, 45°C 恒温酶解 1 h, $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氢氧化钠调节体系 pH 值为 7, 加入 $4000 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ (杂色蛤肉) 复合蛋白酶, 50°C 恒温酶解 3 h, 沸水浴灭酶 15 min。加入 6 wt.% 助干剂, 搅拌均匀, 经喷雾干燥可得杂色蛤酶解粉。

中空盐粉的制备: 饱和氯化钠水溶液中加入 1.5 wt.% 杂色蛤酶解粉, 0.1 wt.% 酵母抽提物, 搅拌均匀, 经喷雾干燥可得中空盐粉。

中空盐粒的制备: 将中空盐粉、聚甘油脂肪酸酯、无水乙醇按照 100:1:50 混合均匀, 使混合物达到适宜的润湿状态。将湿润后的盐粉混合物通过挤压造粒机进行制粒。制得的湿颗粒置于 50°C 鼓风干燥箱中烘干 2 h, 过筛后获得中空盐粒。

实验设置普通盐粒、实心盐粉、中空盐粉及实心盐粒四组对照实验用以系统评价中空盐粒的性能。其中, 普通盐粒为市售食盐; 实心盐粉通过喷雾干燥饱和氯化钠水溶液制备; 中空盐粉基于杂色蛤酶解粉与氯化钠复合体系经喷雾干燥制得; 实心盐粒以实心盐粉为原料, 通过无水乙醇-聚甘油脂肪酸酯湿法旋转造粒加工成型。

1.3.2 微观结构的表征

采用扫描电镜 (Zeiss Merlin Compact) 观察盐样品的形貌。将盐样品均匀分散于粘有导电胶的样品台上, 用洗耳球吹去多余盐样品, 然后将样品台置于离子溅射仪器中进行喷金处理。扫描电镜的工作电压为 10 kV。

1.3.3 盐颗粒密度的测定

盐颗粒堆积密度、振实密度、压缩度的测定参考张秋勤等^[13]的方法。

堆积密度的测定: 称量一定质量 $m \text{ g}$ 的盐颗粒至量筒中, 读取盐颗粒体积 V_1 , 堆积密度 (ρ_1) 用以下公式计算:

$$\rho_1 = \frac{m}{V_1} \quad (1)$$

式中:

ρ_1 ——盐颗粒的堆积密度, $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$;

m ——盐颗粒的质量, g;

V_1 ——盐颗粒的体积, mL。

振实密度的测定: 将含盐颗粒的量筒至于摇床以恒定的振幅匀速振动 100 次得到新体积 V_2 , 振实密度 (ρ_2) 用以下公式计算:

$$\rho_2 = \frac{m}{V_2} \quad (2)$$

式中:

ρ_2 ——盐颗粒的振实密度, $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$;

m ——盐颗粒的质量, g;

V_2 ——振动后盐颗粒的体积, mL。

压缩度的测定: 压缩度用以下公式计算:

$$Y = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

Y ——盐颗粒的压缩度, %;

ρ_1 ——盐颗粒的堆积密度, $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$;

ρ_2 ——盐颗粒的振实密度, $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。

1.3.4 盐颗粒休止角的测定

盐颗粒休止角的测定参考据 Zhao 等^[14]的方法。将一漏斗固定于铁架台上, 并垂直于坐标纸且漏斗的下端离坐标纸的高度为 1 cm。称取一定量的盐颗粒缓慢倾倒入漏斗, 直至粉末锥体的顶部刚好接触漏斗的下端。记录锥体直径。休止角用以下公式计算:

$$F = \arctan \frac{H}{R} \quad (4)$$

式中:

F ——盐颗粒的休止角, $^\circ$;

H ——漏斗的下端离坐标纸的高度, cm;

R ——锥体直径, cm。

1.3.5 盐颗粒溶解性的测定

盐颗粒溶解性的测定参考张阳等^[15]的方法。通过动态电导率测定不同盐颗粒的溶解速率。将一定量的盐颗粒置于盛有 50 mL 去离子水的烧杯中, 用磁力搅拌器 ($60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 搅拌溶解。采用电导率仪对溶解过程进行实时监测, 记录电导率的变化过程。对测试样品的质量进行准确的换算, 保证溶液中氯化钠的最终质量分数为 0.25%。

1.3.6 盐颗粒吸潮性的测定

盐颗粒吸潮性的测定参考刘宇浩等^[16]的方法。取 5.00 g 盐颗粒置于底部盛有过饱和氯化钠溶液 (相对湿度 75%) 的干燥器中, 在 25°C 条件下放置 1、3、5、7 d 后称质量, 吸湿性为每 100 g 样吸附的水分质量。吸湿性用以下公式计算:

$$R = \frac{W_n - W_0}{5} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

R —盐颗粒的吸湿率, %;

W_0 —盐颗粒的初始质量, g;

W_n —盐颗粒 n 天后的质量, g。

1.3.7 盐颗粒抗结块性的测定

称取 5.00 g 盐颗粒样品, 置于洁净的聚乙烯自封袋(规格: 10 cm×15 cm, 厚度 0.08 mm)中, 常温密封避光贮藏 20 d, 记录盐颗粒贮藏结束与初始状态变化, 采用目测法评估结块程度判断结块程度。

1.3.8 盐颗粒电子鼻的测定

采用 PEN3 便携式电子鼻系统, 对不同盐颗粒的风味特征进行检测分析。准确称取 2.00 g 盐颗粒样品, 置于专用电子鼻检测样品瓶(容积 20 mL)中, 立即用聚四氟乙烯密封垫片和瓶盖密封, 并用封口膜进行二次密封, 室温静置平衡 30 min。检测前, 将活性炭过滤器连接至电子鼻的零空气端口, 以提供洁净的冲洗空气。每个样品检测前, 先用空气冲洗传感器, 待传感器基线稳定后, 将连接至电子鼻取样器入口的聚四氟乙烯抽吸针插入样品瓶顶空部进行检测。每个样品平行测定 3 次, 检测结束后再次用零空气冲洗管路 100 s, 以确保传感器充分清洁。实验中使用的 PEN3 电子鼻采用金属氧化物传感器, 并且 10 个传感器能够检测以下材料特性和阈值范围, 通过 Winmuster 软件采集并分析传感器响应值, 关注 W1C (对芳香化合物敏感); W5S (对氮氧化物敏感); W3C (对氨和芳香成分敏感); W6S (对氢气有检测作用); W5C (对烷烃、芳香族化合物以及极性较低的化合物敏感); W1S (对甲烷和碳氢化合物敏感); W1W (对硫化物敏感); W2S (对醇、醛、酮敏感); W2W (对芳香化合物和有机硫化物敏感); W3S (对烷烃敏感) 以评估盐样品的挥发性风味特征^[17]。

1.3.9 感官评价

由 10 名经过感官培训的人员(男女各 5 名)组成感官评价小组, 实验前, 将 20 mg 盐样品分装至 1.5 mL 离心管中, 采用三位数随机编码, 随机交予评价小组成员进行评价。评价时, 评价员将样品置于舌前部, 保持 30 s 后进行感官评定, 评价指标包括咸味峰值强度(0~10 分)、咸味释放速率(0~10 分)、咸味持久性(0~10 分)和颗粒感强度(0~10 分), 其中咸味峰值强度反映最大咸味感知程度, 咸味释放速率表征咸味达到峰值的时间快慢, 咸味持久性评价咸味在

口腔中的持续时间, 颗粒感强度评估盐粒在口腔中的物理刺激程度。每项指标满分为 10 分, 评分间隔用蒸馏水漱口 3 次, 每次间隔 2 min。每个样品重复评定 3 次, 取平均值作为最终评分结果。实验采用单盲法设计, 评价员不知晓样品具体信息, 所有样品均随机呈现, 以避免顺序效应。

1.3.10 统计分析

使用 IBM SPSS 27 软件对数据进行 ANOVA 单因素方差分析和 Duncan 多重比较检验显著性分析($P < 0.05$)。数据以平均值 ± 标准偏差($M \pm SD$)表示。所有实验至少重复三次。使用 Origin 2018 进行图像绘制。

2 结果与分析

2.1 不同盐颗粒微观结构的对比研究

图 1 为不同盐颗粒的扫描电镜图像及其微观结构特征。普通盐粒(图 1a)呈现为边长 200~500 μm 的实心立方体结构。在制备过程中, 高压气流将饱和氯化钠溶液雾化为细小液滴, 液滴在高温干燥塔内与热空气快速接触时水分瞬时蒸发, 形成粉末状实心盐粉(图 1b), 其粒径较普通盐粒显著减小^[18]。

将杂色蛤酶解粉与饱和氯化钠溶液混合后进行喷雾干燥, 成功制备了中空盐粉(图 1c)。在干燥过程中, 溶质发生迁移与自组装, 导致高亲水性酶解粉黏附于盐颗粒表面。由于酶解粉的持水性, 微球内部水分蒸发速率较慢, 导致水分被“锁”于微球核心。随着持续加热, 内部水分气化产生压力, 最终促使外壳破裂, 形成多孔微球结构^[19,20]。

在中空盐粉造粒工艺中, 无水乙醇作为润湿剂与聚甘油脂肪酸酯协同作用, 显著提升体系稳定性。聚甘油脂肪酸酯分子具有典型的两亲性结构, 使其在体系中定向排列。疏水尾部通过分子间作用力相互聚集, 而亲水头部则与乙醇分子发生相互作用。这种排列机制不仅增强了分子内聚力, 还通过增加液体内部摩擦力提升体系黏度, 为颗粒成型提供了必要支持^[21]。无水乙醇的均匀润湿与快速挥发特性, 配合旋转剪切力作用, 确保颗粒均匀成型并快速固化, 从而提升机械强度与稳定性。此外, 氯化钠的溶解性差异对结构保留至关重要, 在极性溶剂中易解离为离子, 而在无水乙醇中因溶解度极低, 颗粒结构得以完整保留。因此, 造粒后实心盐粒仍保持实心结构(图 1d), 而中空盐粒则维持中空微球形态(图 1e)。盐粒通过无水乙醇湿法造粒形成的团聚体属于松散结合结构, 盐粉颗粒

间通过物理接触维持聚集状态，内部保留间隙，而非传统水系造粒中淀粉糊化形成的致密网络。松散结合特性使得宏观团聚体在微观尺度上仍表现为原始盐粉的分散形貌，因此电镜图中盐粒与盐粉的微观结构相似。上述结果表明，无水乙醇作为非极性溶剂可有效维持盐颗粒的结构完整性，为盐颗粒的结构设计提供了重要理论依据。

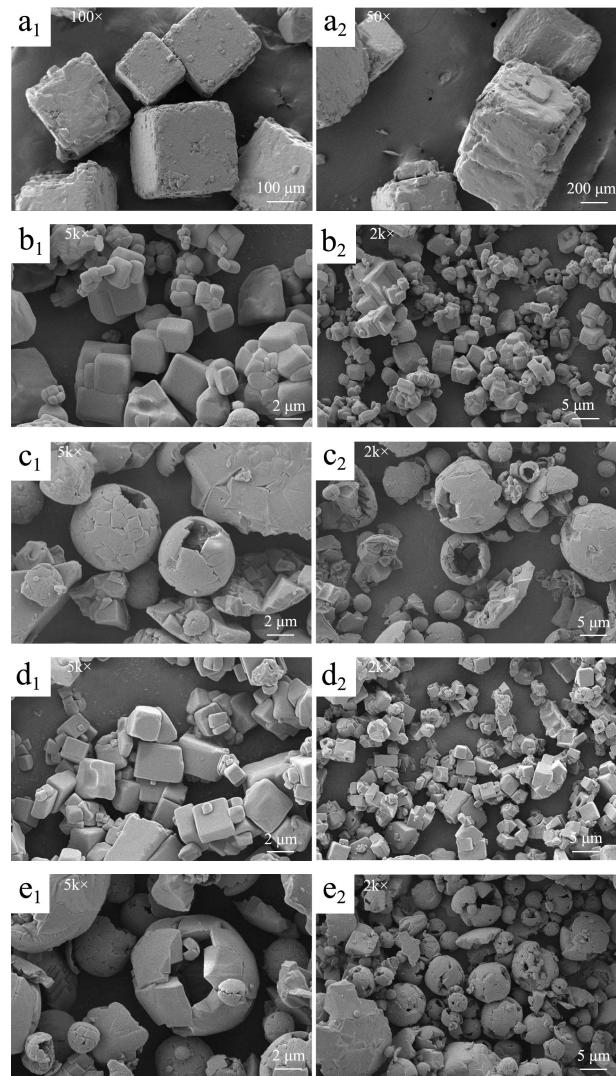


图 1 不同盐颗粒的扫描电镜图

Fig.1 Scanning electron micrographs (SEM) of different salt particles

注: a-普通盐粒; b-实心盐粉; c-中空盐粉; d-实心盐粒; e-中空盐粒。

图 2 为中空盐粒的成品外观图。如图所示，经湿法造粒工艺制备的中空盐粒呈现均一的球形，表面光滑且无明显裂纹或塌陷。堆积时呈现松散、均匀的流动状态，无扬尘现象，有效解决了粉末形态的原料损耗与环境污染问题。颗粒直径通过调节造粒参数可精准控制，满足不同食品加工场景特定需求。



图 2 中空盐粒的成品外观图

Fig.2 Finished appearance of hollow salt particles

2.2 不同盐颗粒密度的对比研究

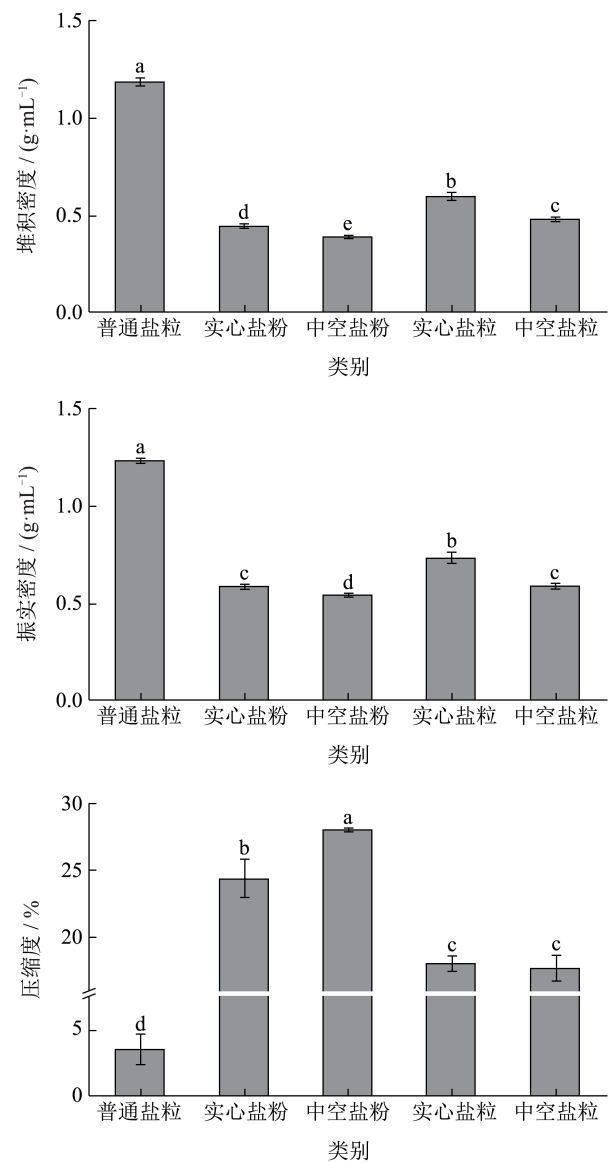


图 3 不同盐颗粒的密度特性

Fig.3 Density properties of different salt particles

注: 图中不同小写字母表示显著性差异 ($P<0.05$)。

图3为不同盐颗粒的密度特性。堆积密度指物料在自由堆积状态时单位体积的质量,振实密度是指物料在振实状态下的填充密度,压缩度是表示物质压缩程度的参数^[22-24]。

中空盐粉与盐粒的堆积密度与振实密度均显著低于实心盐粉和盐粒。实心盐因内部无孔隙且质量较大,堆积时空隙率低,故堆积密度较高。而中空盐内部存在空腔结构,质量轻且堆积时空隙率高,导致密度显著降低^[25]。振实状态下,实心盐因颗粒间的相互作用力可实现紧密堆积,导致振实密度较高;中空盐的颗粒内部空腔在振实过程中产生缓冲效应,削弱颗粒间作用力,振实密度较低。经湿法造粒处理后,中空盐粒的堆积密度和振实密度相较于中空盐粉分别提升23.63%和8.11%,盐颗粒形态趋于规则均一,有效降低了颗粒空隙率。

压缩度较低时,物料流动性良好,粒子间空隙较大、摩擦力较小;中空盐粉因内部空腔受压塌陷,表现出较高压缩度。而造粒处理后,中空盐粒与实心盐粒之间的压缩度差异消失,盐粒结构稳定。张瑞^[26]对 β -碳化硅超细粉分别进行干法和湿法改性造粒后,颗粒压缩度减小,流动性改善。表明造粒工艺可同步改善流动性与抗压性能。

综上所述,湿法造粒处理通过优化颗粒形状和大小,显著提高了盐颗粒的堆积密度和振实密度,同时降低了压缩度对流动性的负面影响,为改善盐颗粒的物理性能提供了有效途径。

2.3 不同盐颗粒休止角的对比研究

图4展示了不同盐颗粒的休止角特性。休止角作为衡量颗粒流动性的核心参数,其数值受颗粒形状、表面粗糙度及颗粒间相互作用力的综合影响^[27]。通常,形状规则且表面光滑的颗粒因摩擦阻力较小,休止角较低,具有更好的流动性^[28]。

实验表明,普通盐粒因粒径较大且表面光滑,颗粒间摩擦与黏附作用最弱,休止角最低,流动性最优;而盐粉由于表面粗糙且形态不规则,休止角显著升高,其中中空盐粉因高比表面积与质量分布不均,休止角较实心盐粉增加29.41%。经无水乙醇造粒处理后,实心盐粒与中空盐粒的休止角趋近一致,较未造粒中空盐粉降低47.32%。于善凯等^[29]发现,50目以下山梨糖醇经沸腾制粒或湿法制粒后,流动性指数明显改善。由于造粒工艺造粒过程改变了颗粒的表面特性,减少了颗粒间的摩擦力和粘附力,从而提高了粉体的整体流动性。这一发现为优化盐类产品加工效率及运输稳定性提供了理论依据。

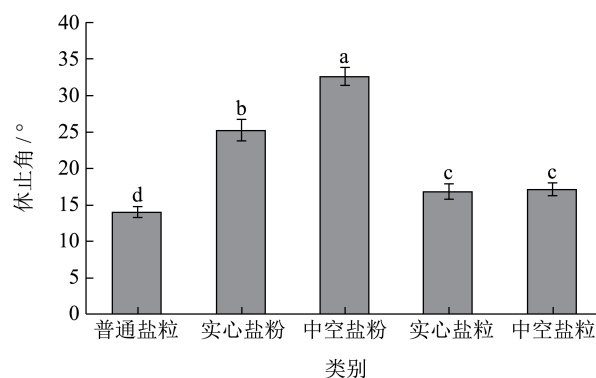


图4 不同盐颗粒的休止角

Fig.4 Angle of repose of different salt particles

注: 图中不同小写字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.4 不同盐颗粒溶解性的对比研究

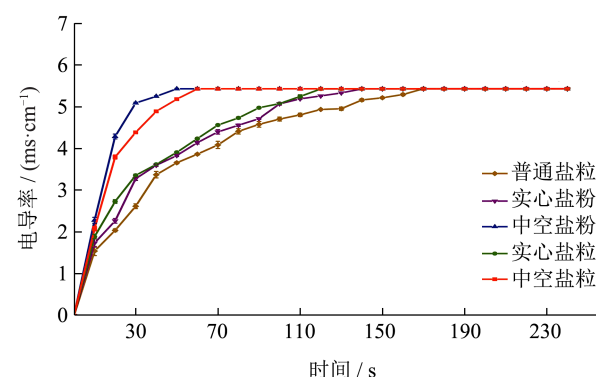


图5 不同盐颗粒的溶解速率曲线

Fig.5 Dissolution rate curves for different salt particles

图5基于动态电导率监测数据展示了不同盐颗粒的溶解速率曲线,其溶解效率呈现显著差异:中空盐粉>中空盐粒>实心盐粒>实心盐粉>普通盐粒。这一溶解行为的差异主要与盐颗粒的微观结构和物理特性密切相关。

普通食盐因晶体尺寸较大,其溶解动力学受限,导致初始电导率上升缓慢,完全溶解需170 s。相较之下,中空盐粉得益于中空微球结构赋予的高比表面积,显著提升了水分子接触效率,溶解时间较普通盐粒缩短了70.59%^[30]。张阳等^[15]通过在氯化钠溶液中加入阿拉伯胶制得GA中空盐完全溶解所需时间相较于普通食盐缩短了62.50%左右,进一步证实中空结构优良的溶解优势。

经造粒处理后,中空盐粒的溶解时间增加10 s,但仍较普通盐粒快64.71%。这可能是由于造粒过程提高了颗粒的致密度,导致水分子需要更长时间渗透和溶解颗粒内部^[31]。实验结果揭示了盐颗粒微观结构与其溶解性能之间的构效关系,通过调控盐颗粒的结构和物理形态,可以实现对盐颗粒溶解性能的改善。

2.5 不同盐颗粒吸湿性的对比研究

为研究不同盐颗粒的吸湿特性，将样品置于恒湿环境（相对湿度 75%）中进行为期 7 d 的储存实验。结果表明，中空盐由于其独特的结构特征表现出明显的吸潮现象，主要归因于其内部存在大量空隙结构，这种多孔特性显著增加了其比表面积。在相同质量条件下，中空盐提供了更多与水蒸气接触的活性位点，因此具有较高的吸湿性^[32]。实验数据显示（表 1），在 7 d 储存期内，中空盐粉的吸湿量达到 4.83%，显著高于普通盐粒。湿法造粒处理后，中空盐粒吸湿量降低至 3.82%，较中空盐粉减少约 20.77%。毕建喆^[33]对姜粉采用顶喷式流化床造粒团聚，发现团聚后所有姜粉吸湿性有所降低。由于造粒过程使盐粉聚集，减少了与环境水蒸气的接触面积，从而减少了可吸附水分的位点，因此吸湿性得以改善。这一发现为优化盐产品的储存稳定性和使用性能提供了重要指导，对于开发新型功能盐产品具有重要的实际意义，特别是在高湿度环境下的应用场景中。

表 1 不同盐颗粒吸湿性变化

Table 1 Variation of hygroscopicity of different salt particles

样品	1 d/%	3 d/%	5 d/%	7 d/%
普通盐粒	0.01 ± 0.01 ^d	0.07 ± 0.01 ^d	0.08 ± 0.02 ^d	0.1 ± 0.03 ^d
实心盐粉	0.02 ± 0.02 ^d	0.13 ± 0.03 ^d	0.16 ± 0.03 ^d	0.18 ± 0.05 ^d
中空盐粉	2.17 ± 0.06 ^a	3.49 ± 0.08 ^a	4.24 ± 0.16 ^a	4.83 ± 0.12 ^a
实心盐粒	0.43 ± 0.01 ^c	0.67 ± 0.10 ^c	0.78 ± 0.07 ^c	0.88 ± 0.04 ^c
中空盐粒	1.77 ± 0.03 ^b	2.83 ± 0.03 ^b	3.37 ± 0.07 ^b	3.82 ± 0.05 ^b

注：图中不同小写字母表示显著性差异（ $P<0.05$ ）。

2.6 不同盐颗粒抗结块性的对比研究

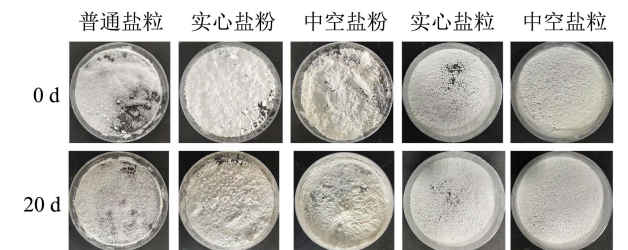


图 6 不同盐颗粒贮藏 20 d 结块情况

Fig.6 Agglomeration of different salt granules for 20 days of storage

图 6 为不同盐颗粒在常温（25±1）℃储存 20 d 后的形态变化。未经造粒处理的样品中，实心盐粉和中空盐粉因吸潮作用均出现显著结块，实心盐粉主要形成直径约 0.5~1.5 cm 的离散球状团块，而中空盐粉则黏结成整体块状，与初始粉末形态差异显著^[34]。这种结块现象会严重劣化盐颗粒的流动性和使用性能，限

制其后续加工和应用。相比之下，经过造粒处理的样品表现出优异的储存稳定性，实心盐粒和中空盐粒在储存后均保持良好分散状态，无明显结块现象，且与初始形态无显著性差异。造粒处理能有效维持盐颗粒的物理稳定性，防止储存过程中的结块现象。这一发现对于开发具有长期储存稳定性的盐产品具有重要意义，特别是在需要保持良好流动性和分散性的应用场景中。

2.7 不同盐颗粒风味轮廓的对比研究

图 7 为基于电子鼻检测系统的风味强度雷达图分析结果。由图可知，中空盐粉与其他盐颗粒样品在风味特征上存在显著差异。在 W1C（芳香成分）、W5S（氮氧化物）、W1S（甲烷和碳氢化合物）、W1W（硫化物）、W2S（醇类、醛、酮类）和 W2W（芳香化合物和有机硫化物）传感器检测指标上，中空盐粉表现出显著区别于其他样品的响应特征。中空盐粉呈现出浓郁的杂色蛤酶解粉特征风味，风味信号强度较高。相比之下，中空盐粒与实心盐粒、实心盐粉及实粒的风味轮廓无显著差异。这种风味特征的主要归因于造粒过程中无水乙醇作为润湿剂能够有效溶解并在挥发阶段去除部分腥味物质，该发现为优化盐产品的风味特性提供了重要参考^[35]。

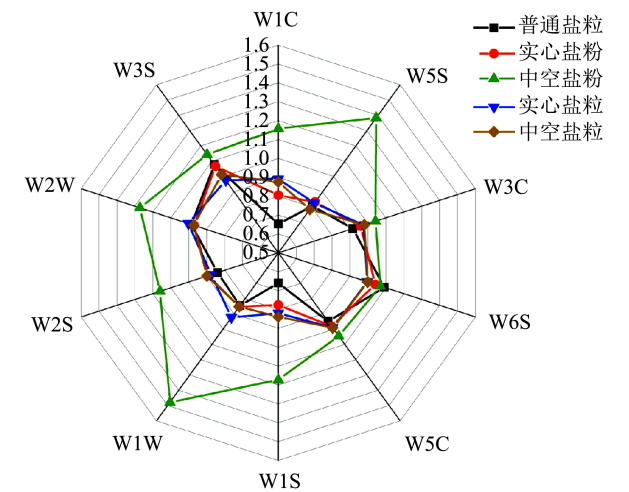


图 7 不同盐颗粒风味强度的雷达图

Fig.7 Radar charts of flavor intensity of different salt particles

2.8 不同盐颗粒感官评价的对比研究

图 8 为不同盐颗粒感官评定的雷达图。通过感官评定雷达图，可以系统地比较其味觉特征的差异。在咸味感知方面，样品的咸味峰值呈现以下规律：中空盐粉>中空盐粒>实心盐粒>实心盐粉>普通盐粒。与普通盐粒相比，中空盐粒对咸味峰值的感官评分提升 36.72%。这种差异主要归因于中空结构提供了更

大的比表面积,增加了与味蕾的接触机会,从而强化咸味感知。在咸味释放动力学方面,各样品的释放速率依次为:中空盐粉>中空盐粒>实心盐粉>实心盐粒>普通盐粒。中空盐粒较普通盐粒对于咸味释放速率的感官评分提升31.01%。这种释放速率的差异与样品的溶解特性密切相关,中空结构由于其独特的微观特征,显著加速溶解过程与离子释放效率。在咸味持久性方面,样品呈现反向分布:普通盐粒>实心盐粒>中空盐粒>实心盐粉>中空盐粉。与中空盐粉相比,中空盐粒感官评分提升8.28%,体现出延缓咸味感知的能力。普通盐粒由于较大的颗粒尺寸和较慢的溶解速率展现出最优持续性,虽然中空盐粒溶解较快,但其独特的结构特征使得咸味回味较为悠长,故持久性未出现显著衰减。在质地特征方面,造粒处理显著改善了产品的感官特性,经造粒处理的中空盐颗粒表现出适度的颗粒感使其特别适用于需要咀嚼感或脆感的食品体系,如脆片、饼干等。而未造粒盐粉因粒径过细,易导致口感单一化,缺乏层次丰富的质地体验。本研究通过建立结构特征-感官特性的对应关系,为盐制品的应用开发提供了科学依据。通过调控盐颗粒的结构特征和加工工艺,可以实现对产品感官特性的精确调控,满足不同食品体系的需求。在实际应用中,可以根据目标产品的特性选择合适的盐颗粒类型,以优化产品的整体感官品质。

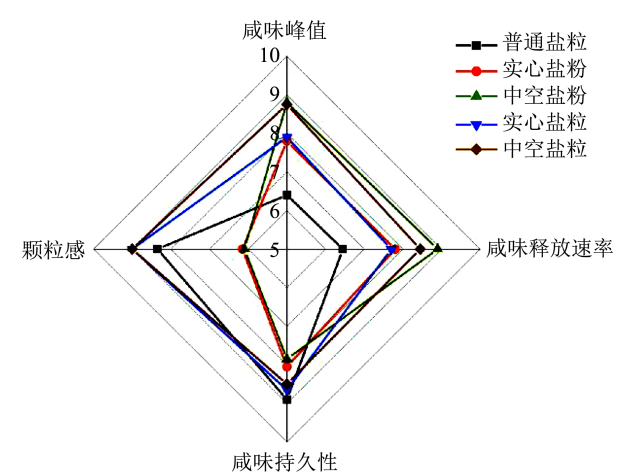


图 8 不同盐颗粒感官评定的雷达图

Fig.8 Radar charts for sensory ratings of different salt particles

3 结论

本研究基于湿法旋转造粒技术,成功实现了杂色蛤中空盐粉的湿法造粒。研究结果表明,造粒后的中空盐粒仍保持了其独特的微观中空结构,同时显著改善了其物理特性。堆积密度和振实密度分别提升了23.63%和8.11%,压缩度和休止角分别降低了

36.98%和47.32%,表明其流动性得到显著提升。溶解性能测试显示,中空盐粒较普通盐粒溶解时间缩短了64.71%,表现出优异的溶解特性。此外,贮藏实验显示造粒处理使中空盐的吸湿性降低了20.77%,并在20 d贮藏期内未出现明显结块现象,展现出良好的抗结块性能。通过电子鼻风味轮廓分析与感官评定,发现无水乙醇造粒工艺有效降低了杂色蛤原料的腥味,同时,中空盐粒咸味持久性感官评分较中空盐粉提升8.28%,咸味峰值和释放速率感官评分较普通盐粒分别提升36.72%和31.01%,具备颗粒质地。综上所述,本研究开发的湿法旋转造粒技术不仅优化了中空盐的物理性能,还提升了其感官品质,为中空盐的工业化生产和应用提供了理论依据和技术支持。

参考文献

[1] SHEN D Y, SONG H L, ZOU T T, et al. Reduction and efficiency of sodium salt: a review [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(10): 3931-3939.

[2] HE J F, GRAHAM A M. Reducing population salt intake worldwide: from evidence to implementation [J]. Progress in Cardiovascular Diseases, 2009, 52(5): 363-382

[3] 孙茜,王薇.多方协同推进人人行动“减盐”[J].中国盐业,2024, 18:24-27.

[4] SUN C L, MA Y, HE M, et al. Preparation and characterization of lutein functional salt by microemulsion stabilized by whey protein isolate and maltodextrin: exploration of a novel dietary nutritional supplement [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 286: 138409.

[5] WANG X J, CUI B Y, LIN H Q, et al. Research progress in saltiness perception and salty substitutes [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(5): 2745-2759.

[6] HE M, TAN M Q. Hollow salt for sodium reduction in foods: mechanisms, influence factors, applications and challenges [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 147: 104451.

[7] CHEN X W, YANG D X, GUO J, et al. Quillaja saponin-based hollow salt particles as solid carriers for enhancing sensory aroma with reduced sodium intake. [J]. Food & Function, 2018, 9 (1): 191-199.

[8] FAN H Z, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Effect of different drying methods combined with fermentation and enzymolysis on nutritional composition and flavor of chicken bone powder [J]. Drying Technology, 2021, 39(9): 1240-1250.

[9] 吕春阳.杂色蛤鲜味料应用产品开发及性质研究[D].大连:大连工业大学,2024.

[10] 李天柱.公路隧道矿山法施工粉尘迁移规律与细水雾除尘参数研究[D].西安:长安大学,2023.

[11] IBRAHIM S, ROMANIAS M, ALLEMAN L Y, et al. Water interaction with mineral dust aerosol: particle size and hygroscopic properties of dust [J]. ACS Earth and Space Chemistry, 2018, 2(4): 376-386.

- [12] LI B R, KATRINA C, ZHENG Z A, et al. Physicochemical properties and rheological behavior of chrysanthemum powder made by superfine grinding and high pressure homogenization [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 44(4): e13652.
- [13] 张秋勤, 缪腾龙, 郑贺云, 等. 糊精添加量对西瓜喷雾干燥粉品质的影响[J]. *中国食品添加剂*, 2024, 35(7): 120-126.
- [14] ZHAO X Y, YANG Z B, GAI G S, et al. Effect of superfine grinding on properties of ginger powder [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 91(2): 217-222.
- [15] 张阳, 李彦磊, 罗卫, 等. 中空盐微球的制备及其理化性质表征[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(4): 76-82.
- [16] 刘宇浩, 刀会仙, 谢纪园, 等. 傣心舒颗粒制备工艺优化及其物理指纹图谱建立[J]. *中成药*, 2025, 47(1): 222-228.
- [17] XING M K, SUN K, LIU Q, et al. Development of novel electronic nose applied for strawberry freshness detection during storage [J]. *International Journal of Food Engineering*, 2018, 14(7-8): 20180111.
- [18] GUO J Y, LI P L, KONG L Y, et al. Microencapsulation of curcumin by spray drying and freeze drying [J]. *LWT*, 2020, 132: 109892.
- [19] 肖侠. 喷雾干燥法制备微/纳米结构高吸油树脂中空微球[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [20] 尚良超, 陈晓东, 肖杰. 喷雾干燥颗粒表面形貌形成过程粗粒化模拟[J]. *化工学报*, 2019, 70(6): 2153-2163, 2409.
- [21] 乔国华. 聚甘油脂肪酸酯的合成与应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [22] SHI Y X, GUO W C, J Y L, et al. Preparation of non-sintered lightweight aggregate ceramsite based on red mud-carbide slag-fly ash: strength and curing method optimization [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 372: 133788.
- [23] 刘钰馨, 盘清华, 吴儒龙. 复配酶作用下多孔玉米淀粉的制备及性能研究[J]. *南宁师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 42(1): 79-85.
- [24] 秦军伟, 任德志, 白雪卫, 等. 机械粉碎多尺度艾叶粉体学性质分析[J]. *沈阳农业大学学报*, 2023, 54(5): 586-591.
- [25] 代雪霞. 基于多减盐策略组合应用的中空盐微球制备与评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
- [26] 张瑞. β -碳化硅超细粉表面物理改性研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
- [27] ILELEJI K, ZHOU B. The angle of repose of bulk corn stover particles [J]. *Powder Technology*, 2008, 187(2): 110-118.
- [28] THAO D, BUDDHIMA I, THANH T N, et al. Interactive role of rolling friction and cohesion on the angle of repose through a microscale assessment [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(1): 04022250.
- [29] 于善凯, 晏永球, 郁新弟, 等. 加工方式对结晶山梨糖醇粉体特性的影响[J]. *食品与机械*, 2024, 40(8): 152-156.
- [30] ZHU M Y, CHENG Y K, LUO Q, et al. A review of synthetic approaches to hollow nanostructures [J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2021, 5(6): 2552-2587.
- [31] 赵蕾蕾, 舒艺周, 漆增连, 等. 不同APP添加量对复合肥料造粒性能的影响[J]. *无机盐工业*, 2024, 56(8): 74-82.
- [32] CHU G, ZHAO J, HUANG Y, et al. Phosphoric acid pretreatment enhances the specific surface areas of biochars by generation of micropores [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 1-9.
- [33] 毕建喆. 喷雾干燥微胶囊化姜粉的制备工艺及团聚改性研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2023.
- [34] 张小军, 余志伟. 不添加抗结剂的食盐防结块探讨[J]. *中国井矿盐*, 2018, 49(4): 7-9.
- [35] SARA P C B, BERTHA B D, SERGIO O S S, et al. Deodorization of *arthrospira platensis* biomass for further scale-up food applications [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(15): 5123-5130.