

中空盐微球的制备及其理化性质表征

张阳¹, 李彦磊², 罗卫¹, 赵如霞³, 王金梅^{2*}, 杨晓泉²

(1. 广东省广盐集团股份有限公司, 广东广州 510055)(2. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)

(3. 广东省盐业集团广州有限公司, 广东广州 510055)

摘要: 该研究以阿拉伯胶(GA)为主要添加剂,通过喷雾干燥法制备中空盐微球,研究了工艺条件对盐微球理化性质的影响。结果表明,GA优良的表面活性促使其在喷干过程中快速迁移至盐微球表面,微球表面C和O的元素含量提升至41.03%和10.97%,形成小粒径(10~20 μm)、低体积密度(0.45 g/mL)、高比表面积的中空盐微球结构,有利于盐晶体的快速溶解(60 s),较普通食盐溶解速度提高约2.67倍。盐微球粒径与GA浓度有关,当GA浓度由0.50%提升至0.75%时,可能形成较厚外壳,提高盐微球粒径;浓度升至1.00%可能降低盐晶核形成和生长的时间,导致盐微球尺寸略微变小。盐浓度对粒径无显著影响。降低进风温度有利于小尺寸盐微球(15.30 μm)的形成。中空盐微球的最佳制备工艺为:GA浓度0.5%,盐浓度35%,进风温度130℃。与普通食盐和食盐-GA混合物相比,盐微球的小尺寸和中空结构有利于提升其在油炸花生米表面的分散性,降低口腔颗粒感,强化花生米的咸度感知和特征风味。该研究可为减盐食品的开发提供理论指导。

关键词: 中空盐微球;阿拉伯胶;喷雾干燥;减盐

文章编号: 1673-9078(2022)04-76-82

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.4.0735

Preparation and Physicochemical Properties of Hollow Salt Microspheres

ZHANG Yang¹, LI Yanlei², LUO Wei¹, ZHAO Ruxia³, WANG Jinmei^{2*}, YANG Xiaoquan²

(1. Guangdong Province Guangdong Salt Group Co. Ltd., Guangzhou 510055, China)

(2. School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(3. Guangdong Salt Industry Group Guangzhou Co. Ltd., Guangzhou 510055, China)

Abstract: In this study, spray-dried hollow salt microspheres were prepared by using gum Arabic (GA) as the main additive and the effects of processing conditions on the physicochemical properties of the hollow salt microspheres were investigated. The results showed that GA migrated quickly to the surface of the hollow salt microspheres due to its excellent surface activity and the atomic percentage of C and O on the surface of the microspheres was increased to 41.03% and 10.97%, respectively. Hollow salt microspheres with minor size (10~20 μm), low volume density (0.45 g/mL) and high specific surface area were produced. The hollow structure was in favor of the rapid melting of salt particles (60 s), which was 2.67-fold faster than normal table salt. The particle size of salt microspheres was highly related to the GA concentration. Thicker GA shell was formed and the particle size was subsequently raised from 12.49 μm to 19.23 μm with the concentration of GA increased from 0.50% to 0.75%, while minor-sized microspheres were fabricated at high concentration (1.0%) due to the effect of GA on reducing the formation and growing time of crystal nucleuses. The salt concentration had no significant effect on the particle size of hollow salt microspheres. Decreasing inlet temperature facilitated the formation of hollow salt microspheres with small particle size (15.30 μm). GA concentration of 0.5%, salt concentration of 35%, and inlet temperature of 130 °C were considered to be the best processing conditions. The minor size and hollow structure of hollow salt microspheres improved the salt dispersity on the surface of fried peanuts, decreased the granular sensation and enhanced the salinity and characteristic flavor of fried peanuts compared to equal amount of normal table salt and salt-GA mixture. This study could

引文格式:

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

ZHANG Yang, LI Yanlei, LUO Wei, et al. Preparation and physicochemical properties of hollow salt microspheres [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(4): 76-82

收稿日期: 2021-07-14

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2020A1515010852); 中央高校基本业务费(SCUT, 2019MS097)

作者简介: 张阳(1991-),男,助理工程师,硕士,研究方向: 食盐及泛盐产品开发, E-mail: 349458098@qq.com

通讯作者: 王金梅(1982-),女,博士,副教授,研究方向: 农产品加工, E-mail: fejmwang@scut.edu.cn

provide the theoretical guidance for the development of salt-reduced food.

Key words: hollow salt microsphere; gum Arabic; spray drying; salt reduction

食盐虽为不可或缺的重要调味品,但高盐饮食会增加罹患高血压、中风和心血管疾病的风险。食盐的主要成分是氯化钠(NaCl),其在食品中的主要作用是增强和改善食品的风味,保鲜以及调节发酵等^[1]。长期高盐(钠)饮食被公认是导致人类高血压、中风和心血管疾病发生的主要因素^[2,3],《中国居民膳食指南》建议,成人食盐摄入量不超过6 g/d,而我国实际人均摄入量高达12 g/d,其中超过70%源自加工食品。减少居民食盐的摄入刻不容缓,“减盐不减咸”的相关研究备受关注。

目前,减少加工食品中盐含量的方法主要为使用食盐替代物、添加呈味物质、控制钠离子在食品中的不均匀分布以及改变食盐的分布及物理形态。制盐企业大多采用氯化钾作为食盐替代物以降低钠含量,但该法往往导致食品感官品质的下降。某些氨基酸例如赖氨酸、肌酐酸二钠等可以弥补低钠香肠中风味的不足,掩蔽氯化钾的苦味^[4]。另外,酪蛋白水解物、植物蛋白水解物和酵母抽提物等浓厚感肽也可以用于奶酪等食品中增鲜增咸^[5]。Li等^[6]报道了通过添加阿拉伯木聚糖和钙离子诱导钠离子在面包中的不均匀分布,获得了减盐30%的效果。

口腔中咸味的感知来自于溶解在舌头上的盐离子的短时浓缩,而不完全取决于食盐的摄入量^[7]。因此,改变食品表面盐晶体的结构或分布可能会增强咸味感知以减少食盐摄入量。空心微胶囊或中空结构常用于药物或营养物质的输送以及催化剂的基质材料^[8,9]。喷雾干燥法常用于制备微胶囊或中空结构,例如微胶囊化的功能油脂和植物蛋白酶解产物等^[10,11]。大分子多糖可用于中空结构的制备,如以麦芽糊精为载体,采用喷雾干燥法制备小尺寸中空盐微球颗粒,提升了咸味释放与感知^[12]。阿拉伯胶是一种从金合欢树枝干切口处获得的天然胶体,在食品中常用作乳化剂、稳定剂和成型剂等。基于阿拉伯胶的表面活性及其在水溶液中的低粘度,阿拉伯胶也常用于风味物质(如单萜烯类)和功能性成分(如蜂蜜)的微胶囊化包埋^[13,14]。Li等^[15,16]利用体外猪舌和人工模拟舌研究了钠离子的黏液穿透能力,发现阿拉伯胶会增加钠离子在黏液层上的滞留,诱导了粘蛋白层的溶胀和钠离子的穿透能力,从而获得减盐的效果。目前未见利用阿拉伯胶在气-液界面上形成外壳制备中空结构颗粒的相关研究。因此,本文以阿拉伯胶为主要添加剂,通过喷雾干燥法制备中空盐微球,研究了工艺条件对中空

盐平均粒径的影响,并对其性质进行了表征,以期减少膳食中食盐的摄入量提供可能的途径和理论依据。

1 材料与方法

1.1 原料

阿拉伯胶(gum Arabic, GA)购自广州卓信生物技术有限公司;生态海盐(食盐)购自广东省盐业集团广州有限公司(NaCl含量为97.05%)。

1.2 仪器与设备

BSA2245分析天平,德国Sartorius公司;Big-squid磁力搅拌器,德国IKA公司;Buchi B-290微型喷雾干燥器,瑞士Buchi公司;Millipore纯水机,美国Millipore公司;PM100球磨机,德国Retsch公司;Merlin高分辨场发射扫描电子显微镜,德国Zeiss公司;能量色散光谱仪(EDS)、X-MaxN20双探测器系统,英国Oxford公司;LA-960S激光散射粒度分析仪,日本Horiba公司;DDS-11A电导率仪,上海仪电雷磁品牌供应商。

1.3 试验方法

1.3.1 中空盐微球的制备

将一定量食盐和GA分散或溶解于去离子水中,室温下连续搅拌60 min形成盐溶液,进行喷雾干燥,分别以进风温度、盐浓度及GA浓度为考察因素进行单因素试验,测定所得中空盐微球的平均粒径。进风温度分别为130、150、170℃;盐浓度分别为25%、30%、35% (m/V);GA浓度为0.50%、0.75%、1.00% (m/V)。其中喷雾干燥设备的出风温度为80℃,通过调节通风量,得到中空盐微球产品。收集产品并保存在聚乙烯密封袋中,置于干燥器内。以食盐和GA混合物为对照样品。

1.3.2 平均粒径的测定

采用激光散射粒度分析仪测定中空盐微球粉体的粒径大小,基于Mie理论计算粉体的粒径大小。仪器的参数设置如下:空气吸力0.4 MPa;样品折射率为1.50。

1.3.3 微观形貌的观察

利用扫描电子显微镜(SEM)观察中空盐微球的微观结构。将少许产品均匀分散于粘有导电胶的样品

台上,再用洗耳球吹去多余产品,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。

1.3.4 能量色散光谱分析

能量色散光谱(EDS)作为SEM的一个配件,可进行微区成分分析,定量分析以及元素分析。通过高速电子撞击样品表面从而产生特征X射线连续谱,EDS利用特征X谱线峰值的位置来确定元素的种类。由此得到某些区域的元素分布图,进而对样品的元素组成进行定性及定量的测定及分析。

1.3.5 体积分数的测定

将 10 mL 的比重瓶烘干至恒重并称重,记为 m_1 ,将不同的食盐产品置于比重瓶中,振实至刻度,准确称量比重瓶与样品的质量,记为 m_2 。根据以下公式计算体积分数 ρ (g/mL):

$$\rho = (m_2 - m_1) / 10$$

1.3.6 动态电导率的测定

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 r/min)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 NaCl 的最终质量分数为 0.25%。

1.3.7 不同盐微球的感官评价分析

人员培训:共有 12 名感官评价小组成员(男性 7 人,女性 5 人,年龄 22~36 岁之间)参与感官评价分析。所有成员没有味道或嗅觉障碍史,了解项目程序及意图,同意参与项目,并依据 ISO 8586^[17]接受培训。小组成员按食盐添加量由低至高的顺序依次品评普通食盐添加量 (m/m) 分别为 0%、0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0% 的 5 种对照油炸花生米,以识别并熟悉其感官属性,即咸味、油炸花生米气味、盐的表面分散性和口腔颗粒感。小组成员确定统一的评价标准,即对 5 种对照样品的各项感官指标分别进行标准化赋值(0.0、2.0、4.0、6.0、8.0、10.0 分)。该过程以各感官指标的实际感知进行赋值,分值不一定与食盐添加量有相关性。赋值完成后,通过 3~4 次交叉核对对组员进行训练,以确保成员间对各指标感知误差达到最小化水平(即不超过 ± 0.3 个单位, $p < 0.05$)。

样品制备:取约 600 g 花生置于盛有 6000 mL 食用油(180 °C)的炸锅中分批煎炸约 5 min,捞出后冷却至室温得油炸花生米。将油炸花生米均分为 3 份,分别称取普通食盐、GA 食盐混合物和中空盐颗粒(GA 浓度 0.5%,盐浓度 35%,进风温度 130 °C 条件下制备) 3.0 g,均匀撒在每份油炸花生米的表面并进行翻滚混

合,制成待测样品。

感官评价:在双盲和标准化条件下进行。3 种待测样品随机进行三位数编号,以每份 10 g、随机给样的方式提供给评价小组成员。要求成员对各样品进行 3 次品评,每次品评时间约 20 s,并反复核查对照样品各项指标的赋值情况后再按 0.0~10.0 评分范围对待测样品的 4 项指标分别进行打分。在各样品品评前后需用矿泉水漱口 2 min 以消除干扰。

1.4 数据处理

所有实验至少进行 3 次取平均值,采用 SPSS 17.0 软件对数据进行显著性分析, $p < 0.05$ 为显著性差异。采用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 中空盐微球的理化性质

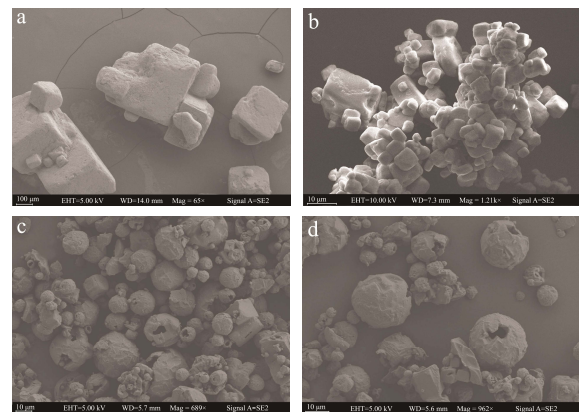


图 1 不同盐颗粒的扫描电镜图

Fig.1 SEM micrographs of different salt particles

注: a: 普通食盐; b: 喷干食盐; c、d: 中空盐微球。

不同盐颗粒的扫描电镜图见图 1。普通食盐呈实心结晶立方体形态,平均边长约 200~500 μm (图 1a);食盐溶液经喷雾干燥后,结晶颗粒虽然变小,比表面积变高,理论上有利于咸度感知的提升,但盐晶体的强吸水性导致其极易发生聚集(图 1b),影响产品的感官性质;添加 GA 的食盐溶液经喷雾干燥后得到颗粒较小(10~20 μm)且呈中空球形结构的盐微球(图 1c、d)。在喷雾干燥过程中,盐溶液经喷嘴雾化后,雾滴迅速被干燥室内的热空气干燥,盐溶液过饱和并开始聚集结晶(图 1b)。水分蒸发及迁移导致雾滴内部溶质发生扩散,且扩散速度与溶质的表面活性直接相关^[18,19]。GA 主要由三种组分组成,其各组分及占比为:阿拉伯半乳聚糖(~90%)、阿拉伯半乳聚糖蛋白混合物(~10%)和糖蛋白(~1%)。其中,阿拉伯半乳聚糖蛋白中含有约 10% 的蛋白,能迅速吸附至界

面,赋予了GA良好的界面活性^[20]。蒸发诱导的扩散流动促使GA在干燥过程中倾向于快速扩散并在气-液表面聚集析出,形成一层覆盖于盐微球表面的外壳结构,雾滴内的水分则由于蒸发速度较慢而被相对大量地锁于壳内。壳内水分不断蒸发为气态,内部压力增大到一定程度后冲破外壳,生成单孔的中空盐微球结构(如图1c、d)。中空盐微球保持了较大的比表面积,且外表面也较为光滑,可避免颗粒之间的凝聚。Chen等^[21]以皂皮皂甙纳米乳滴和食盐为原料,采用喷雾干燥法制备的中空盐微球粒径基本在16 μm以下,说明小分子表面活性剂可显著降低盐微球的尺寸。Cho等^[12]以10%麦芽糊精为载体,制备出平均粒径为10~20 μm的中空盐微球颗粒,且颗粒形貌与本文类似。

表1 EDS分析中碳、氧、钠和氯的表面元素的百分含量

Table 1 EDS atomic percentages (%) of carbon, oxygen, sodium and chlorine of different salt particles

元素	普通食盐/%	食盐GA混合物/%	GA中空盐/%
C	-	34.25±0.83 ^b	41.03±0.52 ^a
O	-	6.62±0.32 ^b	10.79±0.45 ^a
Na	38.38±0.42 ^a	23.38±0.43 ^b	18.03±0.37 ^c
Cl	61.62±0.56 ^a	35.85±0.54 ^b	30.15±0.22 ^c

注:不同字母表示组间存在显著性差异($p < 0.05$)。

为探究阿拉伯胶在中空盐微球中的分布情况,本文采用能量色散光谱分析(EDS)测定中空盐微球的表面元素含量^[22],见表1。由表可知,在食盐中混合GA明显降低了食盐表面Na和Cl的百分含量,增加了C和O的百分含量。与食盐GA混合物相比,喷雾干燥制得的中空盐微球样品表面的Na和Cl进一步降低,C和O的百分含量进一步的提高,说明GA更倾向于分布于中空盐微球表面。这可能是因为GA良好的成膜性导致其在喷雾干燥过程中更易迁移至中空盐微球表面。Chen等^[21]以皂皮皂甙纳米乳滴和食盐为原料,采用喷雾干燥法制备小尺寸中空盐微球,发现该盐微球的表面C和O的百分含量与乳滴添加量呈正比,说明皂皮皂甙良好的界面活性提高了纳米乳滴的传质速率,使得纳米乳滴附着于盐微球表面。

粉体或颗粒的质量与其所占体积的比值称为体积密度。不同盐颗粒的体积密度的测定结果如图2所示。普通食盐(1.29 g/mL)及其与GA的混合物(1.05 g/mL)的体积密度较大,主要因为这些盐颗粒都是由实心的盐晶体组成的;盐微球虽然体积远小于上述两种样品(图1),但中空结构导致其质量也较小,故而体积密度也最小(0.45 g/mL)。

电导率反应了电解质溶液中离子的运动情况。将

等量不同盐颗粒加入相同体积的去离子水中,在不断搅拌的情况下监测了240 s内溶液的电导率变化情况,结果如图3。由图可知,普通食盐溶于水后的初始电导率上升速度较慢,其达到电导率平台期即完全溶解大约耗时160.00 s,这是由于较大的晶体颗粒(~500 μm)不利于传统结晶盐的溶解;食盐GA混合物溶于水后的初始电导率略有提升,完全溶解大约耗时140.00 s,这可能是由于小晶体的结构较为松散,更有利于溶解;中空盐微球溶解于水后初始电导率的增长速度显著高于上述两种样品,完全溶解大约耗时60.00 s,这主要是因为盐微球较大的比表面积增加了其与水的接触面积,故其速溶性最强,电导率增长速度最快。由此可推测,相同添加量下,中空盐微球在味蕾上的溶解时间更短,短时浓缩效率更高,可能可提供较实心盐晶体更强的咸味感知。

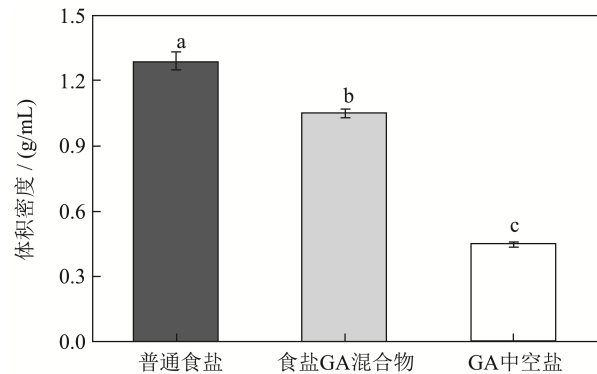


图2 不同盐颗粒的体积密度

Fig.2 Bulk density of different salt particles

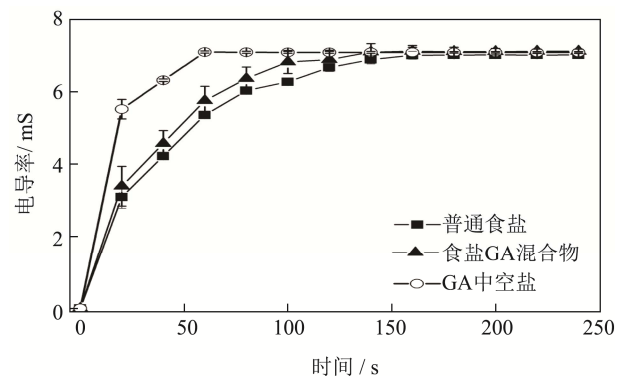


图3 不同盐颗粒在水中的电导率随时间的变化

Fig.3 Conductance changes of different salt particles dissolved in water as a function of time

2.2 不同工艺条件对中空盐微球粒径的影响

喷雾干燥制备中空盐微球的过程中,通过调节工艺条件如喷干参数和配方,可以控制盐微球产品的物理性能^[23]。本文探究了GA浓度、盐浓度和喷干温度对中空盐微球粒径的影响,结果见图4。由图可知,所有样品均呈现良好的单分散性,且粒径约为10~20

μm , 这与图 1 中结果一致, 说明所有样品都形成了结构均一的盐微球结构。GA 浓度对中空盐微球粒径的影响见图 4a, 当 GA 添加量从 0.50% 增加至 0.75% 时, 中空盐微球的粒径从 $12.49 \mu\text{m}$ 升高至 $19.23 \mu\text{m}$, 这可能是由于较高的 GA 浓度形成了较厚的盐微球外壳, 导致壳内水汽需膨胀至更大体积才能冲破外壳形成中空结构, 故盐微球尺寸变大。当 GA 浓度继续增加至 1.00% 时, 中空盐微球粒径略为下降, 这可能是由于高浓度 GA 可能降低了盐晶核形成和生长的时间, 形成了较小的晶体结构。

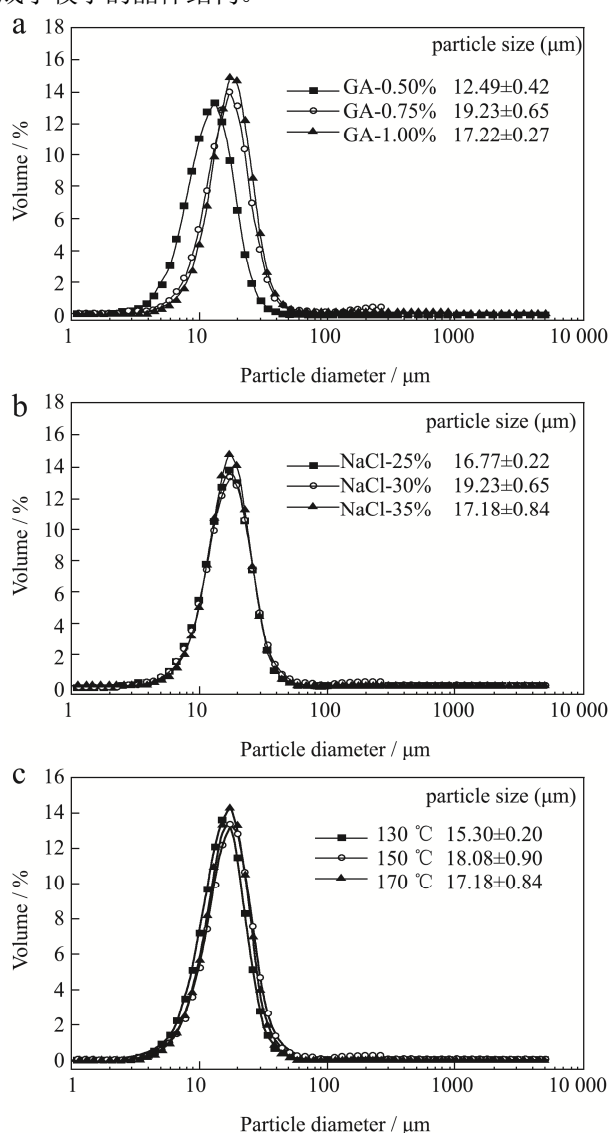


图 4 GA 浓度 (a)、NaCl 浓度 (b) 和进风温度 (c) 对中空盐颗粒的粒径的影响

Fig.4 The effect of GA concentration (a), NaCl concentration (b), and inlet air temperature (c) on particle size of hollow salt particles

在 GA 浓度为 0.75% 时, 考察盐浓度对中空盐微球的平均粒径的影响, 见图 4b。由图可知, 盐浓度对微球粒径并无显著影响。陈小威^[24]以皂皮皂甙纳米乳

滴和食盐为原料制备中空盐微球, 通过 SEM 观察不同盐浓度下中空盐微球的形貌, 发现盐浓度的增加使得纳米乳滴间的接触机会降低从而避免了液滴间的范德华力等相互作用, 提升了盐微球颗粒的分散性, 降低了颗粒间的黏附现象, 但盐浓度对微球的大小和形貌并无显著影响。

在 GA 浓度为 0.75%, 盐浓度为 35% 时, 考察进风温度对中空盐微球的平均粒径的影响, 见图 4c。由图可知, 当进风温度较低 ($130 \text{ }^\circ\text{C}$) 时, 中空盐微球的粒径较小 ($15.30 \mu\text{m}$), 这可能是由于进风温度较低时, 水分蒸发较慢, 盐溶液达到过饱和并形成晶核所需的时间较长, 故产品尺寸较小。提高进风温度后, 盐微球的粒径有所提升, 且 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $170 \text{ }^\circ\text{C}$ 下制备出的盐微球产品粒径并无显著差异, 可能是由于高温提升了水分蒸发速率, GA 快速扩散至气-液表面, 导致盐晶体的生长和大尺寸中空盐微球的形成。喷雾干燥过程中进风温度对产品颗粒尺寸的影响也与进样速率、雾化压力、物料配方等因素有关。Mishra 等^[25]认为进风温度越高越有利于以麦芽糊精为基质的小尺寸印度醋栗汁粉的制备; 而 Cho 等^[12]认为进风温度对盐微球颗粒尺寸影响不大, 但高温 ($170 \text{ }^\circ\text{C}$) 和低温 ($130 \text{ }^\circ\text{C}$) 比起中等温度 ($140 \sim 160 \text{ }^\circ\text{C}$) 更能避免盐微球表面结晶颗粒的形成从而表面光滑的麦芽糊精-盐微球复合物。因此, 不同案例中应对进风温度进行优化才能得到最佳的工艺条件。

整体而言, 当 GA 浓度为 0.5%, 盐浓度为 35%, 进风温度为 $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 可形成粒径较小的中空盐微球颗粒, 在同等添加量下提供最强烈的咸味感知。该工艺条件较为节能, 且物料成本较低, 为中空盐微球颗粒制备的最佳工艺。

2.3 中空盐微球的感官评价分析

为考察中空盐微球的降盐和风味强化作用, 本文评价了在相同添加量下, 不同盐颗粒对油炸花生米的咸度、分散性、口腔颗粒感和炸花生米气味的的影响, 见图 5a。由图可知, 撒有中空盐微球的花生米咸味强度为 6.80 分, 高于普通食盐 (5.10 分) 和食盐 GA 混合物 (6.12 分), 这主要是因为中空盐较大的比表面积增加了其与味蕾的接触面, 从而最大化增强了味觉感知。此外, 中空盐微球的短时浓缩效率最高 (图 3), 可在口腔中产生爆发式的咸味, 加之其颗粒尺寸较小 (图 1c、d), 在花生米表面的分散性较好, 进一步强化了食品在口腔中的咸味感知, 并减弱了口腔颗粒感。盐晶体尺寸对于咸味感知有重要影响。Ruben 等^[26]将不同尺寸盐晶体颗粒撒在无盐薯条表面, 发现颗粒尺

寸越小,越易由口腔扩散并渗透至唾液中,显著缩短达到最强咸味强度的时间并大幅提升咸味感知。Cho等^[12]也报道过以麦芽糊精为添加剂制备的小尺寸盐微球的咸味感知显著高于大尺寸食盐晶体,故在实际应用中可以降低食盐添加量以达到减盐效果。陈小威^[24]以皂皮皂甙纳米乳滴和食盐为原料制备中空盐微球,发现撒有中空盐微球薯条的咸度高于撒有普通食盐的薯条。此外,中空盐微球有利于炸花生米气味的释放与感知,产品的特征风味明显增强。

图5b、5c对比了普通食盐和中空盐微球在花生米表面的分布情况。食盐晶体的粒径约为200~500 μm(图1a、图5b),在花生米表面分布不均(图5b),速溶性也较差(图3),导致人体摄入的盐量远超味觉感知的盐量。中空盐微球的尺寸远小于食盐晶体(图5c),在花生米表面呈现出均匀的小颗粒分布状态。一般而言,降低食品中的含盐量不仅会造成口感的损失,还会减弱食品的风味^[27]。而中空盐微球的小尺寸盐晶体和较大的比表面积可提升咸味感知,降低食盐摄入量,强化产品风味。

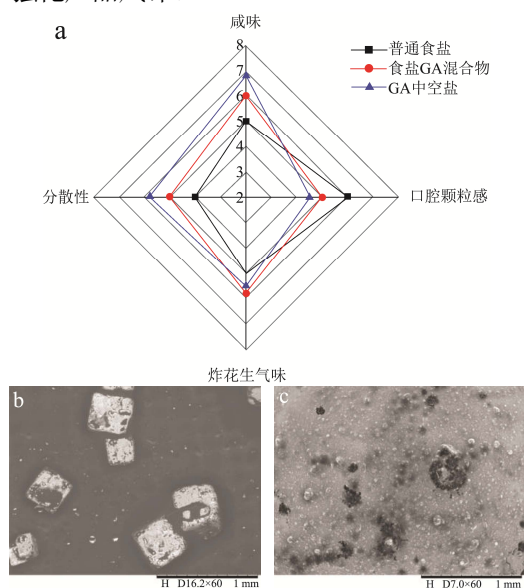


图5 不同盐颗粒用于花生米的感官评价(a);普通食盐(b)和中空盐(c)在花生米表面分布的SEM图

Fig.5 Sensory profiles of the fried peanuts produced by different salt particles (a); and the physical morphology of normal salt (b) and hollow salt (c) on the surface of fried peanuts

3 结论

本研究发现,由于阿拉伯胶具有较高的表面活性,其可在喷雾干燥过程中快速扩散并迁移至盐微球颗粒表面形成一层壳状结构,壳内水分蒸发后冲破外壳形成中空盐微球颗粒。与普通食盐相比,中空盐微球的

粒径从200~500 μm降至10~20 μm,体积密度从1.29 g/mL降至0.45 g/mL,完全溶解时间从160 s降至60 s,颗粒表面C和O元素从未检出分别提升至41.03%和10.97%。当阿拉伯胶从低浓度(0.50%)提升至中等浓度时(0.75%),阿拉伯胶可能形成较厚外壳,导致盐微球粒径从12.49 μm升高至19.23 μm;较高浓度阿拉伯胶(1.0%)可能缩短盐晶核形成和生长的时间,降低盐微球粒径。盐浓度对盐微球粒径无显著影响。较低的喷干进风温度(130 °C)有利于小尺寸盐微球的形成(15.30 μm)。整体而言,中空盐微球的最佳制备工艺为GA浓度0.5%,盐浓度35%,进风温度130 °C。中空盐微球的小尺寸有利于提升其在油炸花生米表面的分散性并降低口腔颗粒感;高比表面积可增大盐微球与味蕾的接触面积;中空结构可加速其在口腔中的溶解,显著提升咸味感知和油炸花生米的特征风味。基于阿拉伯胶的中空盐微球可应用于咸味加工食品以达到“减盐不减咸”的效果。

参考文献

- [1] 袁凤林.食盐的作用与副作用[J].中国食品,1988,7
YUAN Fenglin. Effects and side effects of table salt [J]. Chinese Food, 1988, 7
- [2] Mente A, O'Donnell M J, Rangarajan S, et al. Associations of urinary sodium excretion with cardiovascular events in individuals with and without hypertension: a pooled analysis of data from four studies [J]. The Lancet, 2016, 388(10043): 465-475
- [3] HE Feng, LI Jiafu, Mac Gregor G A. Effect of longer term modest salt reduction on blood pressure: Cochrane systematic review and meta-analysis of randomised trials [J]. BMJ, 2013, 346
- [4] Dos Santos B A, Campagnol P C B, Morgano M A, et al. Monosodium glutamate, disodium inosinate, disodium guanylate, lysine and taurine improve the sensory quality of fermented cooked sausages with 50% and 75% replacement of NaCl with KCl [J]. Meat Science, 2014, 96(1): 509-513
- [5] Khetra Y, Kanawjia S K, Puri R. Selection and optimization of salt replacer, flavour enhancer and bitter blocker for manufacturing low sodium Cheddar cheese using response surface methodology [J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 72: 99-106
- [6] LI Yanglei, HAN Kaining, FENG Guangxin, et al. Salt reduction in bread via enrichment of dietary fiber containing sodium and calcium [J]. Food & Function, 2021, 12: 2660
- [7] Meiselman H L, Halpern B P. Enhancement of taste intensity

- through pulsatile stimulation [J]. *Physiology & Behavior*, 1973, 11(5): 713-716
- [8] Underhill R S, Jovanovic A V, Carino S R, et al. Oil-filled silica nanocapsules for lipophilic drug uptake: implications for drug detoxification therapy [J]. *Chemistry of Materials*, 2002, 14(12): 4919-4925
- [9] Arnal P M, Comotti M, Schüth F. High-temperature-stable catalysts by hollow sphere encapsulation [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2006, 45(48): 8224-8227
- [10] 王大为,任华华,杨嘉丹,等.功能性油脂微胶囊的制备及其稳定性[J].*食品科学*,2018,39(6):264-269
WANG Dawei, REN Huahua, YANG Jiadan, et al. Preparation and stability of microcapsules containing functional lipids [J]. *Food Science*, 2018, 39(6): 264-269
- [11] 黄晓梅,韦翠兰,侯俊杰,等.大豆蛋白酶解产物的微胶囊化及理化性质表征[J].*现代食品科技*,2020,36(7):202-208
HUANG Xiaomei, WEI Cuilan, HOU Junjie, et al. Microencapsulation and characterization of soybean protein hydrolysates [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(7): 202-208
- [12] Cho H Y, Kim B, Chun J Y, et al. Effect of spray-drying process on physical properties of sodium chloride/maltodextrin complexes [J]. *Powder Technology*, 2015, 277: 141-146
- [13] Bertolini A C, Siani A C, Grosso C. Stability of monoterpenes encapsulated in gum Arabic by spray-drying [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2001, 49(2): 780-785
- [14] Suhag Y, Nayik G A, Nanda V. Effect of gum Arabic concentration and inlet temperature during spray drying on physical and antioxidant properties of honey powder [J]. *Journal of Food Measurement & Characterization*, 2016, 10(2): 350-356
- [15] LI Yanlei, WAN Zhili, YANG Xiaoquan. Salt reduction in liquid/semi-solid foods based on the mucopenetration ability of gum Arabic [J]. *Food & Function*, 2019, 10(7): 4090-4101
- [16] LI Yanlei, HAN Kaining, WAN Zhili, et al. Salt reduction in semi-solid food gel via inhomogeneous distribution of sodium-containing coacervate: effect of gum Arabic [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 109: 106102
- [17] ISO 8586: Sensory Analysis-General Guidelines for the Selection, Training and Monitoring of Selected Assessors and Expert Sensory Assessors [S]. International Organization for Standardization, 2012
- [18] Fatnassi M, Tourné-Péteilh C, Cacciaguerra T, et al. Tuning nanophase separation and drug delivery kinetics through spray drying and self-assembly [J]. *New Journal of Chemistry*, 2010, 34(4): 607-610
- [19] Sen D, Mazumder S, Melo J S, et al. Evaporation driven self-assembly of a colloidal dispersion during spray drying: volume fraction dependent morphological transition [J]. *Langmuir*, 2009, 25(12): 6690-6695
- [20] Makri E A, Doxastakis G I. Surface tension of *Phaseolus vulgaris* and coccineus proteins and effect of polysaccharides on their foaming properties [J]. *Food Chemistry*, 2007, 101: 37-48
- [21] CHEN Xiaowei, YANG Danxia, GUO Jian, et al. Quillaja saponin-based hollow salt particles as solid carriers for enhancing sensory aroma with reduced sodium intake [J]. *Food & Function*, 2017, 9(1): 191-199
- [22] Noda T, Tsuda S, Mori M, et al. Determination of the phosphorus content in potato starch using an energy-dispersive X-ray fluorescence method [J]. *Food Chemistry*, 2006, 95(4): 632-637
- [23] Vicente J, Pinto J, Menezes J, et al. Fundamental analysis of particle formation in spray drying [J]. *Powder Technology*, 2013, 247: 1-7
- [24] 陈小威.基于界面工程构建皂皮皂素乳液基食品胶体微结构及其风味控释研究[D].广州:华南理工大学,2017
CHEN Xiaowei. Engineered interface for the microstructural design of emulsion-based food colloids of quillaja saponin with controlled flavor release [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017
- [25] Poonam M, Sanjay M, Charu L M. Effect of maltodextrin concentration and inlet temperature during spray drying on physicochemical and antioxidant properties of amla (*Emblia officinalis*) juice powder [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2014, 92: 252-258
- [26] Rama R, Chiu N, Silva M C D, et al. Impact of salt crystal size on in-mouth delivery of sodium and saltiness perception from snack foods [J]. *Journal of Texture Studies*, 2013, 44(5): 338-345
- [27] Batenburg M, van der Velden R. Saltiness enhancement by savory aroma compounds [J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(5): 1750-3841