

不同壁材组合对三丁酸甘油酯微胶囊性质的影响

桑祯玉¹, 徐青青², 陈莹², 陈晓涵², 杨博¹, 王永华^{2,3}

(1. 华南理工大学 生物科学与工程学院, 广州 510006; 2. 华南理工大学 食品科学与工程学院, 广州 510640; 3. 广东优酶生物制造研究院有限公司, 广东 佛山 528226)

摘要:为拓宽三丁酸甘油酯的应用范围,以三丁酸甘油酯为芯材,抗性糊精-明胶-海藻酸钠(RGS)、抗性糊精-明胶-海藻酸钠-月桂酸单甘酯(RGSG)、抗性糊精-明胶-壳聚糖(RGC)、抗性糊精-明胶-壳聚糖-月桂酸单甘酯(RGCG)为壁材,采用喷雾干燥法制备4种微胶囊,对微胶囊包埋率及产率、粒径分布、基本理化性质、颜色、结构特征及外观形貌进行分析,探究不同壁材对三丁酸甘油酯微胶囊性质的影响。结果表明:RGSG微胶囊包埋率(91.05%)及产率(90.46%)较高;与RGC、RGS微胶囊相比,RGSG、RGCG微胶囊的水分活度、粒径分布、流动性、吸湿性、亮度均有一定的改善;红外光谱及扫描电镜结果表明三丁酸甘油酯被壁材有效包埋起来,其中RGSG、RGCG微胶囊形成了更强的氢键。综上,RGSG制备的微胶囊综合性质优于其他3种壁材。

关键词:三丁酸甘油酯;微胶囊;喷雾干燥;壁材;理化性质;月桂酸单甘酯

中图分类号:TS201.4;TQ645 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)11-0112-07

Effects of different wall material combinations on the properties of tributyrin microcapsules

SANG Zhenyu¹, XU Qingqing², CHEN Ying², CHEN Xiaohan²,
YANG Bo¹, WANG Yonghua^{2,3}

(1. School of Biology and Biological Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Youmei Institute of Intelligent Bio-manufacturing Co., Ltd., Foshan 528226, Guangdong, China)

Abstract: In order to broaden the application range of tributyrin, using tributyrin as the core material, and resistant dextrin-gelatin-sodium alginate (RGS), resistant dextrin-gelatin-sodium alginate-glycerol monolaurate (RGSG), resistant dextrin-gelatin-chitosan (RGC), resistant dextrin-gelatin-chitosan-glycerol monolaurate (RGCG) as wall materials, four kinds of microcapsules were prepared by spray drying method. Tributyrin microcapsules were evaluated with regard to embedding rate and yield, particle-size distribution, basic physicochemical properties, color, structural characteristics and appearance. The results showed that RGSG as the wall material had higher embedding rate (91.05%) and yield (90.46%). Compared with RGS and RGC microcapsules, RGSG and RGCG microcapsules had better water activity, particle-size distribution, fluidity, hygroscopicity and brightness. Fourier transform infrared spectroscopy

and scanning electron microscope revealed that tributyrin were effectively encapsulated. RGSG, RGCG as the wall materials formed more intense hydrogen bonds. In conclusion, the comprehensive properties of tributyrin microcapsules prepared with RGSG as wall material were better than those of the other three kinds of wall materials.

Key words: tributyrin; microcapsule; spray

收稿日期:2022-06-29;修回日期:2023-07-06

基金项目:国家重点研发项目(2019YFD1002403);国家自然科学基金(31930084);国家杰出青年科学基金(31725022);佛山市南海区人才创新创业团队(201811070001)

作者简介:桑祯玉(1998),女,硕士研究生,研究方向为药学(E-mail)1255730887@qq.com。

通信作者:杨博,教授,博士生导师(E-mail)yangbo@scut.edu.cn。

drying; wall material; physicochemical property; glycerol monolaurate

三丁酸甘油酯(TB)是一种具有多种生理功效的短链脂肪酸酯,具有抑制癌细胞生长,预防肝损伤^[1-2],促进畜禽动物肠道健康发育、维持肠道菌群平衡等多种功能^[3],被广泛应用于饲料^[4]、食品^[5]、医药^[6]等领域。但三丁酸甘油酯带有明显苦味及难闻异味,影响了食用意愿和使用效果^[7],限制了三丁酸甘油酯的应用^[8]。因此,改善三丁酸甘油酯的感官特性,对提升三丁酸甘油酯的应用价值具有极其重要的意义。

微胶囊化是一种将活性成分包埋在壁材内形成微胶囊的技术,采用该技术能达到掩蔽芯材气味、提高稳定性的目的^[9]。微胶囊化是改善三丁酸甘油酯性质的常见手段,如:Donovan等^[7]用乳清蛋白、大豆分离蛋白、环糊精等不同食品级壁材制备三丁酸甘油酯微胶囊,发现环糊精包含三丁酸甘油酯具有良好的效果,但载量较低,仅为18%;李泽西^[10]用酶法环糊精包含三丁酸甘油酯,成本较低,但包含过程烦琐。目前,仍然亟须对三丁酸甘油酯微胶囊化进行研究,探索适用于三丁酸甘油酯微胶囊化的壁材。由于壁材各有优缺点,单独使用不易满足工艺和产品要求,因此实际应用中常使用复配壁材^[11]。蛋白与多糖复配具备良好的缓释性能^[12],是复配壁材中常见的组合。月桂酸单甘酯(GML)在食品中应用广泛,具有防腐保鲜的功效,以及优良的乳化性^[13],但关于其作为壁材对微胶囊性质的影响的研究较少。

本文以抗性糊精-明胶-海藻酸钠(RGS)、抗性糊精-明胶-海藻酸钠-月桂酸单甘酯(RGSG)、抗性糊精-明胶-壳聚糖(RGC)、抗性糊精-明胶-壳聚糖-月桂酸单甘酯(RGCC)为壁材,采用喷雾干燥法制备4种三丁酸甘油酯微胶囊,通过考察包埋率及产率、粒径分布、基本理化性质、结构特征、外观形貌,探究不同壁材的复配对三丁酸甘油酯微胶囊性质的影响,探究适合三丁酸甘油酯微胶囊化的壁材,为选择三丁酸甘油酯微胶囊壁材提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

三丁酸甘油酯(纯度95%)、三丙酸甘油酯(纯度98%)、月桂酸单甘酯(纯度90%),广州利必多脂类科技有限公司;抗性糊精,山东百龙创园生物科技股份有限公司;明胶、壳聚糖、海藻酸钠,上海阿拉

丁生化科技股份有限公司;正己烷、甲醇,色谱纯,天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

电子天平,杭州万特衡器有限公司;8860气相色谱仪,安捷伦科技有限公司;DHG-9240A鼓风干燥箱,中仪国科科技有限公司;DF-101S集热式恒温加热磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限责任公司;FJ200-S数显高速分散均质机,上海索映仪器设备有限公司;AH-NANO高压均质机,安拓思纳米技术有限公司;SD-08喷雾干燥机,无锡市和明干燥设备有限公司;YLS16A水分测定仪,上海天美天平仪器有限公司;AquaLab 4TEV水分活度测定仪,美国Decagon公司;PG-5066粉末振实密度测定仪,东莞市品高检测仪器设备有限公司;LS-POP9激光粒度分析仪,珠海欧美克仪器有限公司;CR-400色度计,日本柯尼卡美能达公司;NicoletIS50傅里叶红外光谱仪,Thermo Fisher Scientific公司;Merlin扫描电子显微镜,德国蔡司(Zeiss)公司。

1.2 实验方法

1.2.1 三丁酸甘油酯微胶囊的制备

三丁酸甘油酯微胶囊的制备参考黄珊等^[14]的方法并稍作修改。按表1中的配方将4种复合壁材(壁材各成分比例由预实验所得)分别于70℃下溶解于水中,得到壁材溶液。取一定质量三丁酸甘油酯加入壁材溶液中,使用高速分散均质机以18000 r/min分散均质8 min,50 MPa均质4次,得到微胶囊混合乳液,然后进行喷雾干燥(喷雾干燥进口温度控制在170~180℃,出口温度控制在85~95℃),得到成品三丁酸甘油酯微胶囊。

表1 不同壁材组合三丁酸甘油酯微胶囊的配方

壁材	壁材组合	芯壁比	固形物含量/%
RGS	抗性糊精、明胶与海藻酸钠质量比10:5:1	1:1.6	26
RGSG	抗性糊精、明胶、海藻酸钠与月桂酸单甘酯质量比10:5:1:4	1:2	30
RGC	抗性糊精、明胶与壳聚糖质量比10:5:1	1:1.6	26
RGCC	抗性糊精、明胶、壳聚糖与月桂酸单甘酯质量比10:5:1:4	1:2	30

1.2.2 微胶囊包埋率及产率的测定

1.2.2.1 微胶囊表面油含量的测定

参照郭焰等^[15]的方法测定表面油含量。准确

称取 0.50 g 样品置于 50 mL 离心管中,加入 30 mL 正己烷轻轻振荡 1 min,过滤,同时用 10 mL 正己烷洗涤离心管,洗涤两次,收集滤液到干燥至恒重 (m_1) 的 250 mL 锥形瓶中,减压蒸干溶剂,将锥形瓶放置于 60 °C 烘箱中烘至恒重 (m_2)。微胶囊表面油含量 (ω_1) 按式(1)计算。

$$\omega_1 = (m_2 - m_1) / 0.50 \quad (1)$$

1.2.2.2 微胶囊总油含量的测定

参考 Shi 等^[16]的方法测定总油含量 (ω_2)。称取 0.50 g 样品,加 0.05 g 三丙酸甘油酯(内标),用 5 mL 水溶解,加入 10 mL 甲醇和 5 mL 正己烷,涡旋振荡 5 min,再加入 10 mL 水和 5 mL 正己烷,涡旋振荡 5 min,10 000 r/min 离心 5 min,上清液经 0.45 μm 滤膜过滤,用气相色谱仪测定三丁酸甘油酯含量,即为总油含量 (ω_2)。

气相色谱条件:火焰离子化检测器(FID);HP-5 毛细管色谱柱(60 m \times 0.250 mm \times 0.25 μm);不分流进样;进样口温度 250 °C;载气为氦气,流速 30 mL/min;柱升温程序为 60 °C 保持 2 min,以 30 °C/min 升至 300 °C,保持 10 min。

1.2.2.3 微胶囊包埋率及产率的计算

微胶囊包埋率 (y_1) 及产率 (y_2) 分别按式(2)和式(3)计算。

$$y_1 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2} \times 100\% \quad (2)$$

$$y_2 = \omega_2 / \omega_0 \times 100\% \quad (3)$$

式中: ω_0 为原料中加入的总油含量。

1.2.3 乳液及微胶囊粒径分布的测定

参照朱建宇等^[17]的方法,采用激光粒度分析仪测定三丁酸甘油酯乳液及微胶囊的比表面积平均粒径 $D(3,2)$ 及粒径分布。设置颗粒折射率为 1.414,颗粒吸收率为 0.001,以纯水作为分散剂。

1.2.4 微胶囊基本理化性质的测定

1.2.4.1 含水量的测定

利用水分测定仪对微胶囊的含水量进行测定。称取 0.50 g 微胶囊样品置于仪器的样品盘中,仪器温度设置为 105 °C,时间自动(直至烘干至恒重)。

1.2.4.2 水分活度的测定

参照文献[18],在 25 °C 下用水分活度测定仪检测样品的水分活度。

1.2.4.3 体积密度的测定

参照卢艳慧^[19]的方法并作相应修改。称取 1.20 g 微胶囊,用称量纸直接填充到 25 mL 的玻璃量筒中,防止粉末黏附在量筒壁上,读取体积,计算

体积密度 (ρ_B)。

1.2.4.4 微胶囊堆密度的测定

称取 1.20 g 三丁酸甘油酯微胶囊粉末填充到 25 mL 的玻璃量筒中,利用粉末振实密度测定仪上下振实 200 次,读取体积,计算堆密度 (ρ_T)。

1.2.4.5 流动性的测定

微胶囊的流动性 (C) 按式(4)计算。

$$C = (\rho_T - \rho_B) / \rho_T \times 100\% \quad (4)$$

1.2.4.6 黏附性的测定

微胶囊的黏附性 (R) 按式(5)计算。

$$R = \rho_T / \rho_B \quad (5)$$

1.2.4.7 吸湿性的测定

精确称量约 2.00 g 样品放入培养皿中,置于盛有饱和 Na_2SO_4 溶液的干燥器内(相对湿度 81%),于室温下平衡 1 周。取出后再次称量质量。微胶囊的吸湿性 (Y) 按式(6)计算。

$$Y = m / m_0 \times 100 \quad (6)$$

式中: m 为吸收的水分质量, g; m_0 为样品质量, g。

1.2.5 微胶囊的颜色分析

参照 İltter 等^[20]的方法,使用色度计测量三丁酸甘油酯微胶囊的颜色特性。测量值表示为 L^* (亮度)、 a^* (红色+,绿色-) 和 b^* (黄色+,蓝色-)。色调角 (H^*) 和色度 (C^*) 分别按式(7)和式(8)计算。

$$H^* = \arctan \frac{b^*}{a^*} \quad (7)$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (8)$$

1.2.6 微胶囊的红外光谱扫描

采用 KBr 压片法制样,通过 NicoletIS50 傅里叶变换红外光谱仪记录三丁酸甘油酯、不同壁材、不同壁材组合制备的微胶囊的红外光谱图,波数范围 400 ~ 4 000 cm^{-1} ,分辨率 4 cm^{-1} ^[21]。

1.2.7 微胶囊的扫描电子显微镜表征分析

用扫描电子显微镜观察微胶囊的表面形态。将微胶囊撒在贴有双面胶的待测样品台上,吹去多余粉末,然后喷金,在电压 5.0 kV、放大倍数 5 000 倍条件下,选择合适且清晰的画面观察并拍照^[22]。

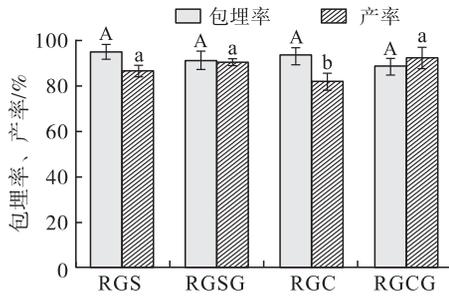
1.2.8 数据处理

各项指标重复测定 3 次,取平均值,采用 SPSS 软件进行显著性分析, $p < 0.05$ 表示具有显著性差异。采用 Origin2022b 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 不同壁材组合对三丁酸甘油酯微胶囊包埋率及产率的影响

不同壁材组合对三丁酸甘油酯微胶囊包埋率及产率的影响见图1。



注:同一指标不同字母表示存在显著性差异($p < 0.05$)

图1 不同壁材组合对微胶囊包埋率及产率的影响

由图1可知:4种壁材的微胶囊的包埋率从大到小排序为RGS、RGC、RGSG、RGCG,但无显著性差异($p > 0.05$);与RGS微胶囊相比,RGC微胶囊产率显著较低;与RGS微胶囊相比,RGSG微胶囊产率由86.63%提升至90.46%,与RGC微胶囊相比,RGCG

微胶囊产率由81.84%提升至92.40%,这可能是由于月桂酸单甘酯具有高熔点的特性^[23],在高温中能够减少芯材的损失量,李春阳^[24]用氢化植物油包裹原花青素也有着相似的高产率。这4种复配组合中,以RGSG为壁材的微胶囊具有较优的包埋率(91.05%)和产率(90.46%),且与Donovan等^[7]的研究相比,载量提高了12%。

2.2 不同壁材组合对三丁酸甘油酯乳液及微胶囊平均粒径的影响

不同壁材组合对三丁酸甘油酯乳液及微胶囊平均粒径的影响见表2。不同壁材组合对三丁酸甘油酯乳液及微胶囊粒径分布的影响见图2。

表2 不同壁材组合对乳液及微胶囊平均粒径的影响 μm

壁材	乳液	微胶囊
RGS	0.88 ± 0.22^d	4.50 ± 0.16^c
RGSG	3.80 ± 0.14^a	12.09 ± 0.28^a
RGC	1.43 ± 0.01^c	4.75 ± 0.10^c
RGCG	2.93 ± 0.01^b	11.26 ± 0.20^b

注:同列不同小写字母表示存在显著性差异($p < 0.05$)。下同

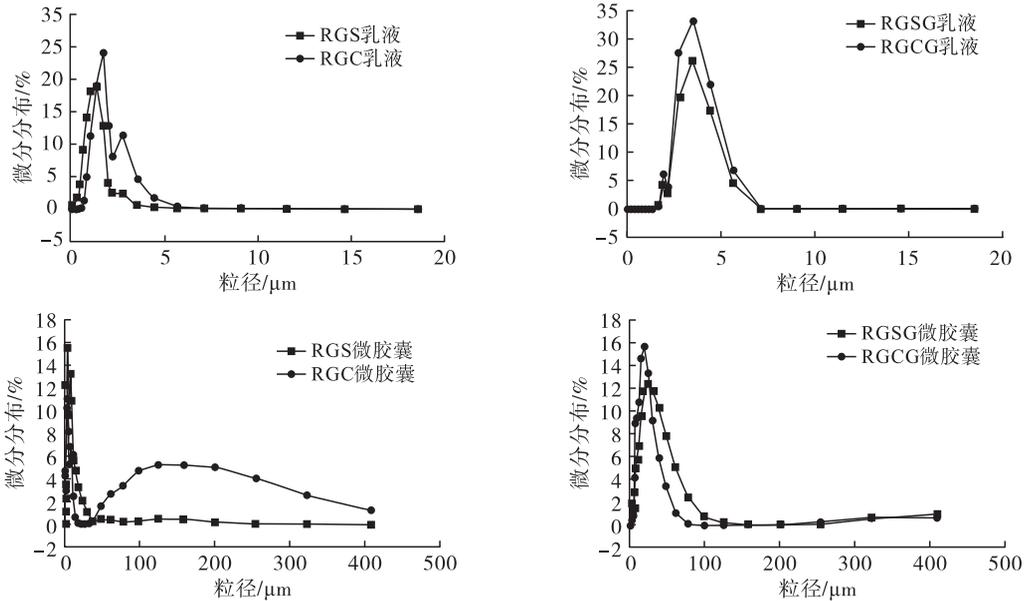


图2 不同壁材组合对乳液及微胶囊粒径分布的影响

粒径过小的微胶囊具有高比表面积和表面能,易自发团聚。同时,微胶囊的粒径分布也可影响微胶囊的其他特性^[25],如黏附性、流动性。因此,适当的粒径大小、均一的粒径分布对制备理化特性良好的微胶囊具有重要作用。由表2可知,使用不同的壁材组合时,微胶囊的平均粒径有显著差异($p < 0.05$)。月桂酸单甘酯使得乳液及微胶囊粒径均增大,其中RGS和RGSG微胶囊的平均粒径分别为 $4.50 \mu\text{m}$ 和 $12.09 \mu\text{m}$,RGC和RGCG微胶囊的平均粒径分别为 $4.75 \mu\text{m}$ 和 $11.26 \mu\text{m}$ 。乳液液滴

大小受喷嘴孔径、喷嘴位置、液体输送速率、雾化空气压力和溶液黏度的影响^[26]。在本研究中,所有乳液均在相同条件下喷雾干燥,因此观察到的粒径变化可能是由于壁材黏度的差异,Carlan等^[27]的研究也得出相似的结论。

由图2可知,RGS乳液和RGS微胶囊粒径较小,呈窄峰分布,而RGC乳液和RGC微胶囊出现双峰。这说明与壳聚糖相比,明胶与海藻酸钠有着更好的相容性,这可能与壁材的电负性相关^[28],明胶与海藻酸钠通过静电复合可形成稳定复合物悬浊

液^[29]。RGSG、RGCG 微胶囊粒径分布曲线呈单峰分布,分布更均一,可能是因为月桂酸单甘酯的结构中同时含有亲水性、亲油性基团,具备一定的乳化性^[23]。

表3 不同壁材组合对微胶囊理化性质的影响

壁材	含水量/%	水分活度	堆密度/(g/mL)	体积密度/(g/mL)	流动性/%	黏附性	吸湿性/(g/100 g)
RGS	2.59 ± 0.14 ^b	0.30 ± 0.01 ^{bc}	0.47 ± 0.01 ^b	0.31 ± 0.00 ^a	35.17 ± 0.81 ^b	1.54 ± 0.02 ^b	10.94 ± 0.70 ^a
RGSG	3.01 ± 0.15 ^{ab}	0.25 ± 0.01 ^c	0.39 ± 0.01 ^c	0.27 ± 0.00 ^b	31.52 ± 0.93 ^c	1.46 ± 0.02 ^{bc}	9.24 ± 0.64 ^b
RGC	3.60 ± 0.45 ^a	0.36 ± 0.04 ^b	0.58 ± 0.01 ^a	0.32 ± 0.01 ^a	45.19 ± 2.04 ^a	1.83 ± 0.07 ^a	8.23 ± 0.39 ^b
RGCG	3.21 ± 0.34 ^{ab}	0.34 ± 0.04 ^{ab}	0.38 ± 0.01 ^c	0.27 ± 0.00 ^c	30.06 ± 1.37 ^c	1.43 ± 0.03 ^c	7.85 ± 0.29 ^c

含水量与粉末的黏附性、流动性、微生物稳定性、氧化稳定性及储存稳定性有关。微胶囊粉末的流动性通常作为干燥微胶囊的质量参数。流动性评估粉末的压缩性或自由流动特性,而黏附性评估粉末的黏结性。流动性、黏附性数值越高证明其流动性越差。吸湿性是指原料从大气中吸收水分的能力,微胶囊粉末吸湿会使脂质氧化而造成粉末团聚、营养物质损失、流动性变差,因此吸湿性数值越高则粉末越不稳定。由表3可知:4种微胶囊均满足含水量在2%~5%的要求^[30];相对于RGS、RGC微胶囊来说,含有月桂酸单甘酯的微胶囊水分活度略微下降,分别由0.30、0.36下降至0.25、0.34,这可能与月桂酸单甘酯的羟基与多糖羟基形成了氢键有关^[31]。İlter等^[20]认为食品粉末的水分活度应低于0.4,满足化学

2.3 不同壁材组合对三丁酸甘油酯微胶囊理化性质的影响

不同壁材组合对三丁酸甘油酯微胶囊理化性质的影响见表3。

和物理稳定性要求,以符合储藏要求。由此可知,本研究中微胶囊具备良好的储存稳定性,且月桂酸单甘酯具有提高其稳定性的潜力。与RGC相比,RGS吸湿性较大,流动性、黏附性较好($p < 0.05$),这与粒径分布结果一致。另外,月桂酸单甘酯使两种微胶囊的流动性、黏附性、吸湿性均有改善,这是因为粒径增大,比表面积较小,使得粉末产品之间不容易发生吸附团聚,因此流动性、黏附性相对较好。由上述分析可知,月桂酸单甘酯具有一定程度改善微胶囊理化特性的潜力,这与平均粒径、粒径分布测定结果相吻合。

2.4 不同壁材组合对三丁酸甘油酯微胶囊颜色的影响

不同壁材组合对三丁酸甘油酯微胶囊颜色的影响见表4。

表4 不同壁材组合对微胶囊颜色的影响

壁材	L^*	a^*	b^*	$H^*/(^{\circ})$	C^*
RGS	92.22 ± 0.52 ^b	-1.30 ± 0.05 ^b	6.10 ± 0.15 ^c	-1.36 ± 0.01 ^b	6.23 ± 0.14 ^c
RGSG	93.78 ± 0.24 ^a	-1.36 ± 0.04 ^b	4.91 ± 0.03 ^d	-1.30 ± 0.01 ^b	5.09 ± 0.04 ^d
RGC	82.45 ± 0.16 ^d	-0.05 ± 0.03 ^a	18.47 ± 0.29 ^a	1.57 ± 0.00 ^a	18.47 ± 0.29 ^a
RGCG	88.46 ± 0.31 ^c	-0.14 ± 0.03 ^b	14.50 ± 0.11 ^b	-1.56 ± 0.00 ^c	14.50 ± 0.11 ^b

注:在色调角(H^*)中, 0° 为纯红色, 90° 为纯黄色, 180° 为纯绿色, 270° 为纯蓝色

食品的颜色对消费者的接受程度起着重要作用。由表4可知,不同壁材组合显著影响了三丁酸甘油酯微胶囊的颜色特性。4种三丁酸甘油酯微胶囊 a^* 值均为负数, b^* 值均为正数,表明在绿、黄区域,这与抗性糊精-明胶的颜色相关。与RGC微胶囊相比,RGS微胶囊亮度(L^*)较高,绿色指数($-a^*$)较大,黄色指数(b^*)较小,均具有显著性差异($p < 0.05$)。月桂酸单甘酯显著增加了微胶囊的亮度(L^*),增大了绿色指数($-a^*$),减小了黄色指数(b^*),呈现出亮白色,同时,显著减小了 C^* 值。根据共轭学说, C^* 值越小,说明其 σ 键更多,更加稳定^[32]。因此,月桂酸单甘酯可能使微胶囊更加稳定。

2.5 不同壁材组合对三丁酸甘油酯微胶囊红外光谱吸收的影响

不同壁材组合对三丁酸甘油酯微胶囊的红外光谱吸收的影响见图3。

傅里叶红外光谱可对微胶囊的结构进行分析。由图3可知,三丁酸甘油酯在2968、2877、1743 cm^{-1} , 1461 cm^{-1} 及1381 cm^{-1} , 1050~1251 cm^{-1} 具有特征吸收峰,分别是 $-\text{CH}_3$ 、 $-\text{CH}_2-$ 的伸缩振动, $\text{C}=\text{O}$ 、 $\text{C}-\text{H}$ 的弯曲振动及 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 的伸缩振动。不同壁材包埋的三丁酸甘油酯微胶囊均结合了壁材与芯材的特征峰,且对比发现三丁酸甘油酯特征峰被削弱,其中750~1013 cm^{-1} 的峰消失,说明三丁酸甘油酯被有效包埋起来。加入月桂酸单甘酯后,与RGS微

胶囊相比, RGSG 微胶囊的羟基峰由 $3\ 381\ \text{cm}^{-1}$ 降低至 $3\ 344\ \text{cm}^{-1}$, 与 RGC 相比, RGCG 微胶囊的羟基峰由 $3\ 433\ \text{cm}^{-1}$ 降低至 $3\ 350\ \text{cm}^{-1}$, 且具备更宽

的峰型, 说明可能形成了更强的氢键^[31], 这验证了前面所述的表征。同时, 氢键的形成支持了壁材的相互作用, 这可能会增加膜的密封性。

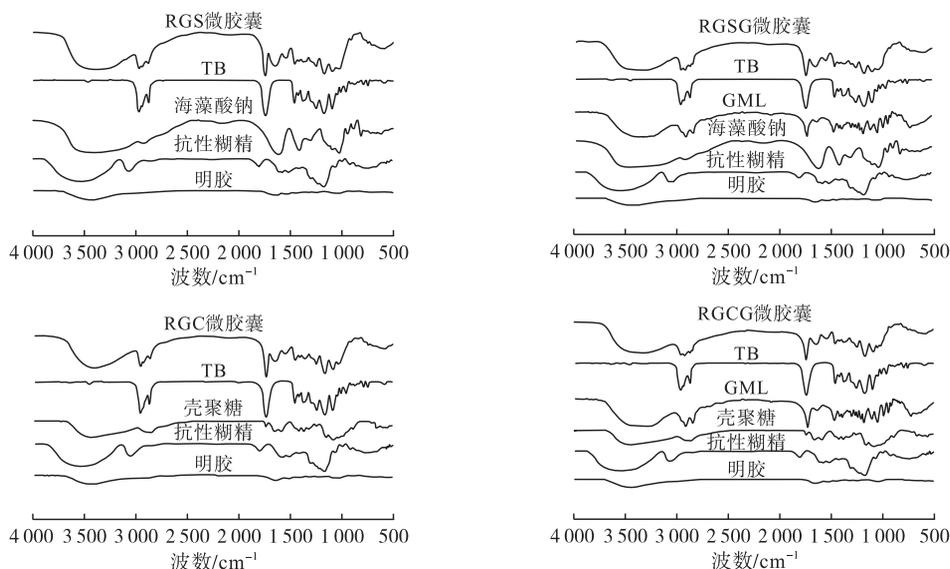


图3 不同壁材、芯材及微胶囊的傅里叶红外光谱图

2.6 不同壁材组合对三丁酸甘油酯微胶囊外观形貌的影响

不同壁材组合对三丁酸甘油酯微胶囊外观形貌的影响见图4。

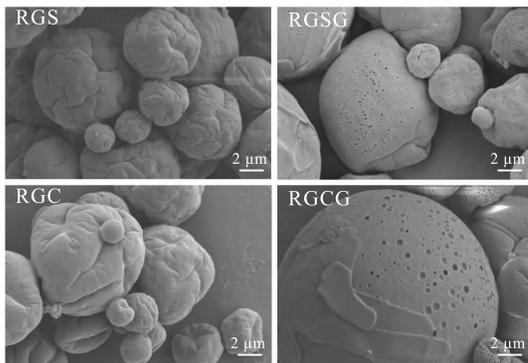


图4 不同壁材组合微胶囊的电子显微镜扫描图

由图4可知, 不同壁材包埋的微胶囊都呈现较为规则的球形或椭球形颗粒, 颗粒直径有一定的差异, 部分颗粒聚集, 大颗粒之间通过挤压作用粘连在一起, 较小的粉末附着在大颗粒表面。RGS 微胶囊表现出更加圆润的形态, 但与 RGC 微胶囊同样具有褶皱。这可能是由于喷雾干燥过程中水分迅速蒸发, 微胶囊膨胀, 失水太快导致壁材不均匀收缩所致^[14]。含月桂酸单甘酯的微胶囊形态发生较大改变, 直径增大, 颗粒表面较为光滑, 有颗粒表面形成补丁状的情况, 这可能是由于月桂酸单甘酯成膜性较差, 不易均匀分散收缩在表面^[24]。整体来说, 4种微胶囊微观形态基本呈现球形, 表面无裂痕, 说明三丁酸甘油酯已被壁材完好包埋, 但壁材对微胶囊

光滑性有较大程度的影响。4种微胶囊与李泽西^[10]采用酶法环糊精包合制备的三丁酸甘油酯微胶囊相比, 形态更加圆润饱满。

3 结论

本文以三丁酸甘油酯为芯材, 采用不同壁材(抗性糊精、明胶、海藻酸钠、壳聚糖、月桂酸单甘酯)进行复配, 在相同工艺下制备了以 RGS、RGSG、RGC、RGCG 为壁材的4种微胶囊。其中 RGSG 微胶囊的包埋率及产率较好, 分别为 91.05% 和 90.46%。4种微胶囊的含水量小于4%, 水分活度小于0.4, 均符合储藏要求。相比 RGC 微胶囊, RGS 微胶囊的粒径分布、含水量、水分活度更好, 而月桂酸单甘酯的添加改善了微胶囊的水分活度、流动性、吸湿性、粒径分布、亮度等理化性质。红外光谱分析结果表明三丁酸甘油酯微胶囊被有效包埋起来, 其中 RGSG、RGCG 微胶囊相对于 RGS、RGC 微胶囊形成了更强的氢键。扫描电镜结果显示 RGS、RGC、RGSG、RGCG 微胶囊均为圆润褶皱球体, 表明三丁酸甘油酯被完好包埋起来。综上, RGSG 综合性质优于其他3种壁材组合。本研究说明壁材对微胶囊的理化性质影响较大, 且理化性质、结构特征、外观形貌三者间有着一定的相关性。同时, 月桂酸单甘酯具有提高微胶囊理化性质的潜力。与已有研究相比, 本研究在工艺较简便的基础上得到了包埋率、产率较高的三丁酸甘油酯微胶囊, 可为选择三丁酸甘油酯微胶囊壁材提供一定的理论基础, 为三丁酸甘油酯微胶囊化及其在食品工业中的应用提供参考。

参考文献:

- [1] MAIER S, REICH E, MARTIN R, et al. Tributyrin induces differentiation, growth arrest and apoptosis in androgen - sensitive and androgen - resistant human prostate cancer cell lines[J]. *Int J Cancer*, 2000, 88(2): 245 - 251.
- [2] CRESCI G A, GLUECK B, MCMULLEN M R, et al. Interactions between gut microbiota and non - alcoholic liver disease; the role of microbiota - derived metab[J]. *J Gastroen Hepatol*, 2017, 32(9): 1587 - 1597.
- [3] DING Y, YANAGI K, CHENG C, et al. Effect of addition of peach gum on physicochemical properties of gelatin - based microcapsule[J]. *J Food Biochem*, 2010, 30(3): 302 - 312.
- [4] 王冰. 三丁酸甘油酯在畜禽生产上的研究进展[J]. *湖南饲料*, 2022(1): 34 - 35, 48.
- [5] DONOVAN J D, LEE S Y, LEE Y. R - index measure of microencapsulated tributyrin in γ - cyclodextrin influenced by drying method[J]. *J Food Sci*, 2016, 81(9): S2252 - S2257.
- [6] HEIDOR R, FESTA ORTEGA J, DE CONTI A, et al. Anticarcinogenic actions of tributyrin, a butyric acid prodrug[J]. *Curr Drug Targets*, 2012, 13(14): 1720 - 1729.
- [7] DONOVAN J D, CADWALLADER K R, LEE Y. Volatile retention and morphological properties of microencapsulated tributyrin varied by wall material and drying method[J]. *J Food Sci*, 2016, 81(3): E643 - E650.
- [8] NEWMARK H L, YOUNG C W. Butyrate and phenylacetate as differentiating agents; practical problems and opportunities [J]. *J Cell Biochem*, 1995, 59(S22): 247 - 253.
- [9] 卓祖优, 宋生南, 白小杰, 等. 天然高分子在微胶囊壁材中的应用[J]. *包装工程*, 2021, 42(15): 112 - 121.
- [10] 李泽西. 环糊精 - 三丁酸甘油酯包合体系的酶法构建、表征及其包合机理研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2020.
- [11] 张碳, 谭天伟, 凌沛学. 微胶囊壁材在食品工业中的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2011, 37(5): 132 - 138.
- [12] 刘漪萱, 陈雅琪, 陈维宁, 等. 缓释型精油微胶囊壁材的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(2): 405 - 410.
- [13] 冯凤琴, 杜鹃, 王小刘. 食品防腐乳化剂月桂酸单甘油酯及其在食品中的应用[J]. *中国食品添加剂*, 2009(21): 173 - 177.
- [14] 黄珊, 刘嘉, 李贵华, 等. 壁材对方竹叶黄酮微胶囊结构及抗氧化性能的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(22): 55 - 61.
- [15] 郭焰, 陈静. 核桃粉微胶囊抗氧化稳定性研究[J]. *科技信息*, 2006(9): 59 - 61.
- [16] SHI X, MONACO M H, DONOVAN S M, et al. Encapsulation of tributyrin by γ - cyclodextrin: complexation, spray drying, and in vitro fermentation [J]. *J Food Sci*, 2020, 85(10): 2986 - 2993.
- [17] 朱建宇, 齐宝坤, 李杨, 等. 不同壁材对大豆生物解离乳状液微胶囊品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(22): 56 - 61.
- [18] 章鹏飞, 刘爱琴, 赵洪山, 等. 微胶囊化姜黄素微粒的应用[J]. *化工管理*, 2020(25): 79 - 81.
- [19] 卢艳慧. 牡丹籽油微胶囊化及理化和稳定特性的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021.
- [20] İLTER I, KOÇ M, DEMIREL Z, et al. Improving the stability of phycocyanin by spray dried microencapsulation [J/OL]. *J Food Process Pres*, 2021, 45(7): 15646 [2022 - 04 - 22]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15646>.
- [21] 薛露, 彭珍, 关倩倩, 等. 不同壁材对 β 胡萝卜素微胶囊性质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(14): 47 - 54.
- [22] 唐冬, 宋其斌, 郭向阳, 等. 三种壁材组合方式茶籽油微胶囊产品的研究[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(6): 96 - 100.
- [23] 蒋增良, 杨明, 杜鹃, 等. 月桂酸单甘油酯抑菌抗病毒特性及其在食品中的应用[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(2): 142 - 146.
- [24] 李春阳. 葡萄籽中原花青素的提取纯化及其结构和功能研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2006.
- [25] HONG K, NAKAYAMA K, PARK S. Effects of protective colloids on the preparation of poly (*l* - lactide)/poly (butylene succinate) microcapsules [J]. *Eur Polym J*, 2002, 38(2): 305 - 311.
- [26] XIE Y L, ZHOU H M, QIAN H F. Effect of addition of peach gum on physicochemical properties of gelatin - based microcapsule[J]. *Food Biochem*, 2006, 30: 302 - 312.
- [27] CARLAN I C, ESTEVINHO B N, ROCHA F. Production of vitamin B₁ microparticles by a spray drying process using different biopolymers as wall materials [J]. *Can J Chem Eng*, 2020, 98(8): 1682 - 1695.
- [28] 贾双珠, 李长安, 刘品祯, 等. 壳聚糖的应用研究进展[J]. *精细与专用化学品*, 2022, 30(1): 25 - 30.
- [29] 陈海华, 于芮, 王雨生. 明胶与海藻酸钠的静电复合机制及热动力学分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(8): 52 - 59.
- [30] 岳海鹏, 王卫飞, 杨博, 等. 亚麻籽二酯油乳液制备工艺优化及其微胶囊理化性质分析[J]. *中国油脂*, 2023, 48(5): 62 - 68.
- [31] 杨颀, 张为俊, 裴世鑫, 等. N—H...O 红移氢键和蓝移氢键的理论研究[J]. *中国科学: B 辑: 化学*: 2006(3): 218 - 226.
- [32] 刘金萍. 关于物质颜色与结构之间相关规律性的研究[J]. *沈阳大学学报*, 2004, 16(2): 94 - 96.