

维生素 E - 大豆蛋白微胶囊的制备及特性分析

殷琦^{1,2}, 郑志^{1,2}, 姜绍通^{1,2}, 赵妍嫣^{1,2}

(1. 合肥工业大学 食品与生物工程学院, 合肥 230601; 2. 农产品现代加工安徽省重点实验室, 合肥 230601)

摘要:为生产包封效率高、稳定性好的维生素 E 微胶囊产品, 以大豆分离蛋白/硫酸葡聚糖复合颗粒或大豆分离蛋白与麦芽糊精作为复合壁材, 大豆油和维生素 E 为芯材, 通过冷冻干燥法制备维生素 E - 大豆蛋白微胶囊, 通过对微胶囊包封效率、粒径、傅里叶红外光谱 (FT-IR)、水分含量、润湿性、溶解度、吸湿性、堆积密度、振实密度、流动性、内聚性等理化性质的探究, 考察壁材组成对微胶囊特性的影响。结果表明: 壁材组成对微胶囊的理化性质具有显著影响; 微胶囊最佳壁材组成为大豆分离蛋白/硫酸葡聚糖复合颗粒含量 4 g/100 mL (以乳液体积计) 和麦芽糊精含量 12 g/100 mL (以乳液体积计), 在此条件下微胶囊的包封效率为 89.31%, 粒径为 1.39 μm , 且颗粒较为均一, 水分含量较低, 润湿性较低, 溶解度较高, 吸湿性较小, 流动性较差, 内聚性较强。综上, 以大豆分离蛋白/硫酸葡聚糖复合颗粒和麦芽糊精作为复合壁材制备的维生素 E - 大豆蛋白微胶囊包封效率高, 粉末特性好。

关键词:大豆分离蛋白; 硫酸葡聚糖; 复合壁材; 维生素 E; 微胶囊

中图分类号: TS201; TS207.3 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2024)05-0060-06

Preparation and properties of vitamin E - soybean protein microcapsules

YIN Qi^{1,2}, ZHENG Zhi^{1,2}, JIANG Shaotong^{1,2}, ZHAO Yanyan^{1,2}

(1. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Agricultural Products Modern Processing, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to produce vitamin E microcapsules with high encapsulation efficiency and good stability, vitamin E - soybean protein microcapsules were prepared by freeze-drying method with soybean protein isolate (SPI)/dextran sulfate composite granules or SPI and maltodextrin as composite wall materials, soybean oil and vitamin E as core materials. The effects of wall composition on microcapsule properties were investigated by exploring encapsulation efficiency, particle size, FT-IR, moisture content, wettability, solubility, hygroscopicity, bulk density, solidification density, flowability and cohesion of microcapsules. The results showed that the wall composition had a significant effect on the physicochemical properties of microcapsules. The optimal wall composition of microcapsules was 4 g/100 mL SPI/dextran sulfate composite granules (in terms of emulsion volume) and 12 g/100 mL maltodextrin (in terms of emulsion volume). Under these conditions, the encapsulation efficiency of microcapsules was 89.31%, the particle size was 1.39 μm , and the particles were more homogeneous, with lower moisture content, lower wettability, higher solubility, lower hygroscopicity, poorer flowability as well as higher cohesion. In conclusion, the vitamin E - soybean protein microcapsules prepared with SPI/dextran sulfate composite granules and maltodextrin as the composite wall material shows high encapsulation efficiency and good powder characteristics.

Key words: soybean protein isolate; dextran sulfate; composite wall material; vitamin E; microcapsules

收稿日期: 2023-03-05; 修回日期: 2024-01-16

基金项目: 安徽省重大科技计划项目 (202103b06020009)

作者简介: 殷琦 (1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程 (E-mail) 1437261709@qq.com。

通信作者: 赵妍嫣, 副教授, 硕士生导师 (E-mail) zhaoyanyan@hfut.edu.cn

维生素 E 是一种亲脂性生物活性化合物, 可以防止光老化, 滋润皮肤, 并保护组织免受紫外线的伤

害^[1]。然而,维生素 E 水溶性较差,且对不利环境如光、高温、氧气和碱性环境具有敏感性,严重限制了其应用范围。将维生素 E 进行微胶囊化处理可以保护其免受氧气、光照和湿度的影响,改善其在加工过程中的稳定性,并提高溶解度和溶解速率。

微胶囊制备过程中,壁材的选择会显著影响其稳定性。由于单一的碳水化合物或者蛋白作为微胶囊的壁材通常容易受其本身性质的影响,不能满足微胶囊溶解度、渗透性和芯材释放等方面的需求,因此需要加入其他成分以提高微胶囊的理化特性。大豆蛋白作为微胶囊壁材,具有良好的成膜性和乳化特性,并且价格相对便宜^[2]。多糖具有高溶解度和高稳定性特点,可与大豆蛋白形成静电相互作用,从而提高微胶囊的壁材特性,如陈敬鑫等^[3]将大豆分离蛋白和可溶性大豆多糖进行静电复合作为壁材,提高了所制备的微胶囊的溶解性和溶液稳定性。硫酸葡聚糖可通过静电相互作用与带正电荷的蛋白形成复合物颗粒,其对 pH 变化具有较强的稳定性^[4]。麦芽糊精作为一种水解性淀粉,其溶解性较好,高浓度条件下黏度较低,并且可以提高芯材的氧化稳定性,通常被用作微胶囊的壁材。但是,麦芽糊精的低保油性和乳化性,使其在作为微胶囊壁材时必须与其他材料相配合^[5],如戚登斐等^[6]以麦芽糊精、大豆分离蛋白和阿拉伯胶为复合壁材,制备出具有高包封效率和高溶解度的核桃油微胶囊。

本研究以大豆油和维生素 E 为芯材,以大豆分离蛋白/硫酸葡聚糖复合颗粒和麦芽糊精为复合壁材,通过冷冻干燥法制备维生素 E-大豆蛋白微胶囊,并与以大豆分离蛋白和麦芽糊精为复合壁材制备的微胶囊进行比较。通过对微胶囊的粒径、包封效率、傅里叶红外光谱(FT-IR)以及理化性质的探究,考察壁材组分对微胶囊特性的影响,以期生产具有包封效率高、稳定性好的微胶囊产品提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

维生素 E(纯度 $\geq 97\%$)、大豆分离蛋白、麦芽糊精、硫酸葡聚糖(超纯级),上海源叶生物科技有限公司;大豆油(食品级),上海益海嘉里集团。

1.1.2 仪器与设备

MX-S 涡旋振荡仪,美国赛洛捷克公司;SN-MS-6D 磁力搅拌器,上海尚仪仪器设备有限公司;Regulus 8230 冷冻干燥机,青岛永合创新有限公司;BP-3/100 超高压均质机,宝派环保科技上海有限公司;LC-CB-1000E 超声波细胞破碎仪、ZD-85

台式气浴摇床,上海力辰仪器科技有限公司;Mastersizer2000 马尔文激光粒度仪,英国马尔文仪器有限公司;Nicolet iS 50 傅里叶变换红外光谱仪,美国 Thermo Nicolet 公司;高速剪切机;紫外-可见分光光度计。

1.2 实验方法

1.2.1 大豆分离蛋白/硫酸葡聚糖复合颗粒的制备

配制 2 g/100 mL 的大豆分离蛋白溶液并在超声功率 200 W 下超声处理 10 min。将硫酸葡聚糖和超声处理过的大豆分离蛋白溶液按质量体积比 1:1 混合,使用盐酸调节 pH 至 3.5,冷冻干燥并研磨,得到大豆分离蛋白/硫酸葡聚糖复合颗粒(SD)。

1.2.2 微胶囊的制备

O/W 型乳液的制备:将大豆分离蛋白(S)或 SD、麦芽糊精(MD)分别溶于蒸馏水中,加入大豆油和维生素 E,通过高速剪切机以 12 000 r/min 剪切 3 min,形成粗乳液,再采用超高压均质机以 100 MPa 的压力均质 2 次获得 O/W 型乳液,O/W 型乳液最终组成如表 1 所示。

表 1 O/W 乳液组成 g/100 mL

乳液	S	SD	MD	大豆油	维生素 E
S1	2	0	14	3.2	0.8
S2	3	0	13	3.2	0.8
S3	4	0	12	3.2	0.8
SD1	0	2	14	3.2	0.8
SD2	0	3	13	3.2	0.8
SD3	0	4	12	3.2	0.8

将 O/W 型乳液冷冻干燥处理 24 h,得到维生素 E-大豆蛋白微胶囊,于 4℃ 下避光密封储存。由乳液 S1、S2、S3、SD1、SD2、SD3 制备的微胶囊分别命名为 M_{S1}、M_{S2}、M_{S3}、M_{SD1}、M_{SD2}、M_{SD3}。

1.2.3 微胶囊包封效率的测定

根据 Sharipova 等^[7]的方法测定微胶囊包封效率。将 0.1 g 微胶囊样品和 10 mL 80% 乙醇混合于 15 mL 离心管中,在涡旋振荡仪上振荡 5 min,过滤,使用紫外-可见分光光度计在 290 nm 处测定滤液吸光度,计算维生素 E 含量。包封效率(E)按公式(1)计算。

$$E = \frac{m_m}{m_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_m 为微胶囊中提取的维生素 E 质量; m_t 为添加的维生素 E 质量。

1.2.4 微胶囊粒径的测定

利用马尔文激光粒度仪测定微胶囊粒径及其分布。将样品分散到以空气为载气的检测器中进行检

测。根据公式(2)和(3)分别计算体积平均直径($D_{[4,3]}$)和粒度分布(S)。

$$D_{[4,3]} = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3} \quad (2)$$

$$S = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}} \quad (3)$$

式中: n_i 为粒径为 d_i 时的颗粒数; D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别为粒径为累积体积的10%、50%、90%时的颗粒数。

1.2.5 微胶囊的傅里叶红外光谱(FT-IR)分析

对大豆油、维生素E和微胶囊进行傅里叶红外光谱分析。FT-IR条件:光谱扫描范围400~4000 cm^{-1} ,光谱分辨率4 cm^{-1} 。

1.2.6 微胶囊水分含量的测定

称取0.5 g微胶囊于铝锅中,置于105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干燥至恒重,以烘干前后质量差计算其水分含量。

1.2.7 微胶囊润湿性的测定

根据De Barros Fernandes等^[8]的方法并稍加修改。将0.1 g微胶囊样品分散在25 $^{\circ}\text{C}$ 的50 mL蒸馏水表面,在300 r/min的磁力搅拌速率下,记录微胶囊样品浸没时间。

1.2.8 微胶囊溶解度的测定

在室温条件下,将0.5 g微胶囊样品分散在25 mL蒸馏水中,在200 r/min下持续搅拌20 min,然后以8000 r/min离心15 min,将上清液转移到坩埚中,并在105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干燥至恒重。微胶囊的溶解度(D)按公式(4)计算。

$$D = \frac{m}{m_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: m_0 为微胶囊的质量,g; m 为上清液干燥至恒重的质量,g。

1.2.9 微胶囊的吸湿性分析

根据Cai等^[9]的方法并稍加修改。称取0.5 g微胶囊样品于25 mL烧杯中,并在含有饱和氯化钠溶液(相对湿度75%)的干燥器中放置7 d,称量吸收的水分,以每100 g样品吸收的水的质量表征微胶囊的吸湿性。

1.2.10 微胶囊的堆积密度和振实密度分析

根据Goyal等^[10]的方法测定。将2 g微胶囊样品缓慢倒入10 mL量筒底部,从量筒中读取的体积为堆积体积。将2 g微胶囊样品装入10 mL量筒中,轻轻敲击量筒至微胶囊体积不再发生变化,并测量微胶囊的最终体积,为振实体积。微胶囊的堆积密度和振实密度分别按公式(5)和(6)计算。

$$\rho_B = \frac{m_1}{V_B} \quad (5)$$

式中: ρ_B 为堆积密度,g/mL; V_B 为堆积体积,mL; m_1 为微胶囊的质量,g。

$$\rho_T = \frac{m_2}{V_T} \quad (6)$$

式中: ρ_T 为振实密度,g/mL; V_T 为振实体积,mL; m_2 为微胶囊的质量,g。

1.2.11 微胶囊流动性和内聚性的测定

微胶囊的流动性和内聚性分别根据卡尔指数(C)和豪斯纳比(H)评估,分别按公式(7)和(8)计算。

$$C = \frac{\rho_T - \rho_B}{\rho_T} \times 100 \quad (7)$$

$$H = \frac{\rho_T}{\rho_B} \quad (8)$$

1.2.12 数据统计分析

所有实验重复3次,结果以“平均值 \pm 标准差”表示。使用SPSS Statistics 26对数据进行方差分析和Duncan's test($p < 0.05$)多重比较,并使用Origin 2019b软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 微胶囊的包封效率

表2为不同壁材组合下制备的微胶囊的包封效率。

表2 微胶囊的包封效率

微胶囊	包封效率/%
M _{S1}	67.57 \pm 0.40 ^d
M _{S2}	67.44 \pm 0.40 ^d
M _{S3}	68.41 \pm 0.33 ^c
M _{SD1}	68.89 \pm 0.35 ^c
M _{SD2}	76.75 \pm 0.20 ^b
M _{SD3}	89.31 \pm 0.13 ^a

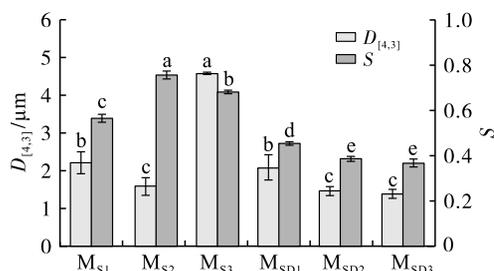
注:同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同

由表2可知,当微胶囊的蛋白质成分一致时,M_{S3}和M_{SD3}包封效率在同组中相对较高,分别为68.41%和89.31%,说明随着蛋白质量浓度的提高,有利于微胶囊包埋维生素E。当微胶囊的壁材之间的质量比相同时,M_{SD}的包封效率显著高于M_S,说明蛋白种类对维生素E包封效率的影响显著。与单一的S相比,SD作为亲水性聚合物用于递送疏水性生物活性成分的载体可以提高其溶解度,从而提高其包封效率。与Parthasarathi等^[11]通过冷冻干燥法制备的维生素E微胶囊包封效率为86.10%相比,本研究中以4 g/100 mL的SD作为壁材制备的

微胶囊具有更高的包封效率。

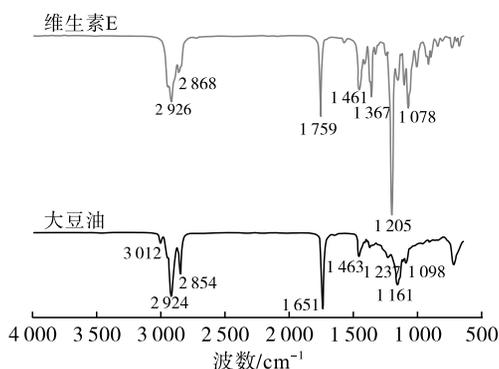
2.2 微胶囊的粒径

粒径是微胶囊的一个重要特征,其对微胶囊的外观、流动性以及分散性具有很大影响。微胶囊的体积平均直径和粒度分布如图1所示。



注:同一指标不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同

图1 微胶囊的体积平均直径和粒度分布



由图1可知,当壁材中使用SD时,可以在一定程度上减小微胶囊的粒径,这可能是由于SD比S有利于形成更加均匀的壳层结构。结合表2可知,当微胶囊的粒径最小且粒度分布一致性较好时,一定量的芯材组分被均匀地包埋在微胶囊中,更多的芯材可以得到较好的保护,其包封效率最大^[12]。根据体积平均直径和粒度分布,可以推测出 M_{SD3} 的配方为最佳配方,其体积平均直径($1.39 \mu\text{m}$)显著低于强军锋等^[13]制备的明胶-海藻酸钠包埋维生素E微胶囊($17.43 \mu\text{m}$),说明本研究有利于改善微胶囊的特性。

2.3 微胶囊的FT-IR分析

维生素E、大豆油和微胶囊的FT-IR图谱见图2。

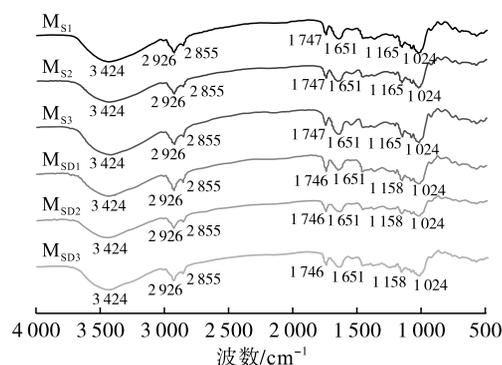


图2 维生素E、大豆油和微胶囊的FT-IR图谱

由图2可知:维生素E的特征谱带有 2926 、 1759 、 1461 、 1367 、 1205 cm^{-1} 和 1078 cm^{-1} ;大豆油的特征谱带有 2924 、 2854 、 1651 、 1463 、 1237 cm^{-1} 和 1161 cm^{-1} ;而在微胶囊的FT-IR图谱中没有发现维生素E 1759 cm^{-1} 处的羰基伸缩振动峰以及 1205 cm^{-1} 处的C—O—C反对称伸缩振动峰,这可能是因为微胶囊将维生素E包埋起来,使其特征峰变得不明显。微胶囊在 2855 cm^{-1} 和 2926 cm^{-1} 处出现由C—H伸缩振动所产生的吸收峰,表明壁材和油相之间发生结合,进而说明微胶囊具有较好的包封效率^[14];微胶囊在 3424 cm^{-1} 处出现峰型较为宽大的振动峰,这归因于羟基(O—H)的伸缩振动^[15]。

2.4 微胶囊的水分含量

水分含量是影响微胶囊保质期的重要指标。较低的水分含量可以降低微胶囊霉变降解以及吸潮团聚现象的产生,在减少活性成分流动和分散的同时,降低脂质氧化和微生物生长的风险,保证了芯材储存的稳定性。一般来说,水分含量在3%~10%间的食品在储存过程中具有良好的稳定性^[10]。微胶囊的水分含量如图3所示。

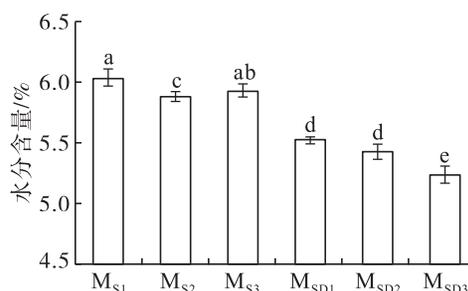


图3 微胶囊的水分含量

由图3可知,本研究制备的微胶囊水分含量均较低。且使用同种类蛋白壁材麦芽糊精含量较高时,微胶囊的水分含量总体越大,这可能是由于高水解程度麦芽糊精含有大量亲水基团,这些亲水基团在干燥后与空气中的水分子结合导致^[16]。

2.5 微胶囊的润湿性和溶解度

微胶囊的润湿性是体现微胶囊吸收水分和重构乳液能力的重要指标。在食品加工中,粉末溶解到水中的时间越短,其物理属性越好。溶解性是衡量微胶囊质量的决定性因素,溶解性差的微胶囊产品不易加工而导致经济效益降低。微胶囊的润湿性和溶解度见表3。

表3 微胶囊的润湿性和溶解度

微胶囊	湿润性/s	溶解度/%
M _{S1}	397.7 ± 4.7 ^b	88.73 ± 0.04 ^c
M _{S2}	340.7 ± 8.5 ^d	89.24 ± 0.88 ^c
M _{S3}	437.3 ± 6.0 ^a	81.62 ± 0.78 ^d
M _{SD1}	387.0 ± 2.6 ^b	91.49 ± 0.38 ^b
M _{SD2}	368.3 ± 7.2 ^c	91.71 ± 0.35 ^b
M _{SD3}	328.3 ± 6.5 ^e	94.00 ± 0.23 ^a

由表3可知, M_{SD3}(粒径最小, 为1.39 μm) 浸没时间最短, 其次是 M_{S2}, 而 M_{S3}(粒径最大, 为4.58 μm) 浸没时间最长。De Barros Fernandes 等^[17]研究表明, 减小颗粒粒径会增强微胶囊的润湿性, 这与本研究的结果一致。这可能是因为减小粒径, 可以增加微胶囊的表面积, 从而提高了其与水的相互作用。M_{SD3}浸没时间(328.3 s)比 M_{S3}(437.3 s)更短, 表明当 S 或 SD 质量浓度为 4 g/100 mL 时, 壁材组分对微胶囊润湿性的影响显著($p < 0.05$)。可能是因为 SD 比 S 亲水性更好, 从而会促进水扩散到微胶囊中, 缩短其浸没时间。由表3还可知, 溶解度与润湿性结果一致, 且润湿性越强, 溶解度越高。微胶囊的溶解度范围为 81.62% ~ 94.00%。M_S的溶解度显著低于 M_{SD}的, 这种差异很大程度上依赖于微胶囊所用的包封材料^[18], SD 的溶解度明显高于 S 的溶解度, 因此可以明显改善微胶囊的溶解性。

2.6 微胶囊的吸湿性

吸湿性是微胶囊从周围环境中吸附水分的能力。当微胶囊吸附的水分含量高时, 会导致脂质氧化和粉末的聚集, 从而影响微胶囊的营养性和流动性, 而吸湿性较低的样品更容易处理和包装。微胶囊的吸湿性如图4所示。

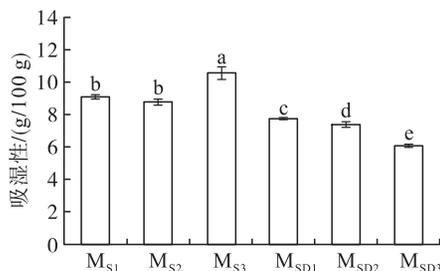


图4 微胶囊的吸湿性

由图4可知, M_{SD}的吸湿性(6.11 ~ 7.76 g/100 g)显著低于 M_S的(8.76 ~ 10.56 g/100 g), 说明微胶囊壁材对其吸湿性具有显著影响($p < 0.05$)。这可能是由微胶囊粒径、粗糙度和空隙率的差异造成的。

2.7 微胶囊的堆积密度和振实密度

堆积密度和振实密度是与微胶囊处理、包装和运输过程相关的重要物理性质。微胶囊的堆积密度

和振实密度如表4所示。

表4 微胶囊的堆积密度和振实密度 g/mL

微胶囊	堆积密度	振实密度
M _{S1}	0.365 ± 0.006 ^d	0.576 ± 0.008 ^d
M _{S2}	0.355 ± 0.008 ^e	0.558 ± 0.003 ^e
M _{S3}	0.271 ± 0.001 ^f	0.436 ± 0.003 ^f
M _{SD1}	0.412 ± 0.002 ^c	0.651 ± 0.004 ^c
M _{SD2}	0.422 ± 0.001 ^b	0.678 ± 0.013 ^b
M _{SD3}	0.442 ± 0.002 ^a	0.721 ± 0.009 ^a

由表4可知, 微胶囊的堆积密度受壁材的影响显著($p < 0.05$), 范围在 0.271 ~ 0.442 g/mL 之间。较低的堆积密度表明微胶囊之间存在更多空隙, 其在储存过程中更易氧化降解^[19]。M_{SD}的堆积密度比 M_S的高, 意味着 M_{SD}抗氧化性较强, 有利于储存。此外, 与罗惠^[20]制备的维生素 E 微胶囊相比, M_{SD}的堆积密度均较高, 可以有效提高其在储存过程中的抗氧化性。不同壁材制备的微胶囊的振实密度具有显著差异($p < 0.05$), 范围在 0.436 ~ 0.721 g/mL 之间。由于敲击导致的密度值增加可能与粉末的流动性有关。M_{SD}较高的堆积密度和振实密度可能与其具有较小的粒径有关。

2.8 微胶囊的流动性和内聚性

流动性和内聚性是工业生产微胶囊的重要质量参数。微胶囊的流动性和内聚性如表5所示。

表5 微胶囊的流动性和内聚性

微胶囊	C	H
M _{S1}	36.713 ± 0.800 ^b	1.580 ± 0.020 ^b
M _{S2}	36.429 ± 1.014 ^b	1.573 ± 0.025 ^b
M _{S3}	37.776 ± 0.441 ^{ab}	1.607 ± 0.011 ^{ab}
M _{SD1}	36.763 ± 0.248 ^b	1.581 ± 0.006 ^b
M _{SD2}	37.719 ± 1.224 ^{ab}	1.606 ± 0.032 ^{ab}
M _{SD3}	38.734 ± 0.585 ^a	1.633 ± 0.016 ^a

由表5可知: M_{S1}、M_{S2}、M_{S3}、M_{SD1}和 M_{SD2}的卡尔指数在 36.429 ~ 37.776 之间, 豪斯纳比在 1.573 ~ 1.607 之间, 表明微胶囊的流动性较差, 内聚性较强; M_{SD3}的卡尔指数和豪斯纳比分别为 38.734 和 1.633, 表明其流动性非常差, 内聚性极强^[21]。一方面, 微胶囊表面的油相会导致微胶囊表面黏度增加, 从而提高颗粒间相互黏结的可能性, 导致微胶囊流动性较差; 另一方面, 微胶囊的粒径减小会导致单位质量的表面积提高, 微胶囊之间的高接触表面积会产生更高的内聚力和摩擦力, 从而导致流动阻力增大, 流动性变差。M_{SD3}具有流动性差和内聚性高的特点, 与其他微胶囊之间存在一定的差异, 这可能是 M_{SD3}具有较小的粒径以及壁材中 SD 与 MD 共同作用造成的。

3 结论

以大豆分离蛋白/硫酸葡聚糖复合颗粒和大豆分离蛋白为实验材料,与麦芽糊精进行不同质量的复配获得壁材,并对维生素E进行包埋,经过冷冻干燥处理获得维生素E-大豆蛋白微胶囊,研究了微胶囊的包封效率、粒径、FT-IR、水分含量、润湿性、溶解度、吸湿性、堆积密度、振实密度、流动性、内聚性等理化性质。结果表明,微胶囊最佳壁材组成为大豆分离蛋白/硫酸葡聚糖复合颗粒含量4 g/100 mL(以乳液体积计)和麦芽糊精含量12 g/100 mL(以乳液体积计),在此条件下微胶囊的包封效率为89.31%,粒径为1.39 μm ,且颗粒较为均一,粉末特性好。

参考文献:

- [1] HUANG E, QUEK S Y, FU N, et al. Co-encapsulation of coenzyme Q10 and vitamin E: A study of microcapsule formation and its relation to structure and functionalities using single droplet drying and micro-fluidic-jet spray drying[J]. J Food Eng, 2019, 247: 45-55.
- [2] 朱迅涛,许时婴. 以大豆蛋白制备微胶囊化鱼油的研究(I):微胶囊化鱼油的壁材选择[J]. 中国油脂, 1998, 23(5):31-34.
- [3] 陈敬鑫,刘族昕,吕静祎,等. 大豆分离蛋白/可溶性大豆多糖作为生物活性物质包埋载体的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(4):193-202.
- [4] YUAN Y, LI H, ZHU J, et al. Fabrication and characterization of zein nanoparticles by dextran sulfate coating as vehicles for delivery of curcumin[J]. Int J Biol Macromol, 2020, 151:1074-1083.
- [5] CHANG C, VARANKOVICH N, NICKERSON M T. Microencapsulation of canola oil by lentil protein isolate-based wall materials[J]. Food Chem, 2016, 212: 264-273.
- [6] 戚登斐,张润光,潘建龙,等. 核桃油微胶囊制备及其生理功能评价[J]. 中国油脂, 2021, 46(1):24-31,47.
- [7] SHARIPOVA A, AIDAROVA S, GRIGORIEV D, et al. Polymer-surfactant complexes for microencapsulation of vitamin E and its release[J]. Colloids Surf B, 2016, 137: 152-157.
- [8] DE BARROS FERNANDES R V, BORGES S V, SILVA E K, et al. Study of ultrasound-assisted emulsions on microencapsulation of ginger essential oil by spray drying[J]. Ind Crops Prod, 2016, 94:413-423.
- [9] CAI Y Z, CORKE H. Production and properties of spray-dried *Amaranthus betacyanin* pigments[J]. J Food Sci, 2000, 65(7):1248-1252.
- [10] GOYAL A, SHARMA V, SIHAG M K, et al. Development and physico-chemical characterization of microencapsulated flaxseed oil powder: A functional ingredient for ω -3 fortification[J]. Powder Technol, 2015, 286:527-537.
- [11] PARTHASARATHI S, ANANDHARAMAKRISHNAN C. Enhancement of oral bioavailability of vitamin E by spray-freeze drying of whey protein microcapsules[J]. Food Bioprod Process, 2016, 100:469-476.
- [12] WANG X, DING Z, ZHAO Y, et al. Effects of lutein particle size in embedding emulsions on encapsulation efficiency, storage stability, and dissolution rate of microcapsules through spray drying[J/OL]. LWT - Food Sci Technol, 2021, 146:111430[2023-03-05]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111430>.
- [13] 强军锋,梅自寒,郭欢,等. 天然V_E油微胶囊的储存稳定性研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(3):127-130.
- [14] 马云标,朱科学,周惠明. 维生素E微胶囊的理化性质表征[J]. 中国油脂, 2010, 35(1):55-59.
- [15] LIN N, HUANG J, CHANG P R, et al. Effect of polysaccharide nanocrystals on structure, properties, and drug release kinetics of alginate-based microspheres[J]. Colloids Surf B, 2011, 85(2):270-279.
- [16] ZHU J, LI X, LIU L, et al. Preparation of spray-dried soybean oil body microcapsules using maltodextrin: Effects of dextrose equivalence[J/OL]. LWT - Food Sci Technol, 2022, 154:112874[2023-03-05]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112874>.
- [17] DE BARROS FERNANDES R V, BORGES S V, BOTREL D A. Gum arabic/starch/maltodextrin/inulin as wall materials on the microencapsulation of rosemary essential oil[J]. Carbohydr Polym, 2014, 101:524-532.
- [18] BAKRY A M, HUANG J, ZHAI Y, et al. Myofibrillar protein with κ - or λ -carrageenans as novel shell materials for microencapsulation of tuna oil through complex coacervation[J]. Food Hydrocolloid, 2019, 96:43-53.
- [19] TONON R V, GROSSO C R F, HUBINGER M D. Influence of emulsion composition and inlet air temperature on the microencapsulation of flaxseed oil by spray drying[J]. Food Res Int, 2011, 44(1):282-289.
- [20] 罗惠. 乳清蛋白-麦芽糊精微胶囊的制备及对活性物质的包埋与保护[D]. 江苏无锡:江南大学, 2022.
- [21] CHEW S C, TAN C P, NYAM K L. Microencapsulation of refined kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) seed oil by spray drying using β -cyclodextrin/gum arabic/sodium caseinate[J]. J Food Eng, 2018, 237:78-85.