

# 虾活性肽微胶囊的制备工艺优化及其理化性质

吴泽龙<sup>1,2</sup>, 白锴凯<sup>1</sup>, 何建林<sup>1</sup>, 洪碧红<sup>1\*</sup>

(1. 自然资源部第三海洋研究所 海洋生物资源开发利用工程技术创新中心, 福建 厦门 361005; 2. 福建农林大学 食品科学学院, 福建 福州 350002)

**摘要:** 为提高虾活性肽的稳定性和作用效果, 以阿拉伯胶和 $\beta$ -环糊精为壁材, 采用喷雾干燥法制备虾活性肽微胶囊(shrimp bioactive peptide microcapsules, SBPM), 实现虾活性肽的微胶囊化, 并开展制备工艺优化和理化性质研究。试验结果表明: 当壁材比(阿拉伯胶与 $\beta$ -环糊精的质量比)为3:1、芯材与壁材质量比为1:4、固形物含量为15%、单甘酯添加量为0.4%时, 制备的SBPM为淡黄色类粉末, 呈现类球体结构, 无孔洞、开裂及不良气味, 特征粒径 $D_{90} < 10 \mu\text{m}$ , 流动性良好, 虾活性肽包埋率为 $(90.11 \pm 0.23)\%$ ; 虾活性肽与壁材之间的分子间相互作用促使二者形成微胶囊; 微胶囊化可明显降低虾活性肽的吸湿性; SBPM经模拟胃肠液消化12h的多肽累计释放量达89.82%, 具有较好的缓释性能。

**关键词:** 南美白对虾; 虾活性肽; 微胶囊; 喷雾干燥; 工艺优化

## Optimization of Preparation Process and Physicochemical Properties of Shrimp Bioactive Peptide Microcapsules

WU Zelong<sup>1,2</sup>, BAI Kaikai<sup>1</sup>, HE Jianlin<sup>1</sup>, HONG Bihong<sup>1\*</sup>

(1. Technical Innovation Center for Utilization of Marine Biological Resources, Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, Fujian, China; 2. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

**Abstract:** In order to improve the stability and efficacy of shrimp bioactive peptides, microencapsulation was carried out with Arabic gum and  $\beta$ -cyclodextrin as wall materials through a spray-drying method, generating shrimp bioactive peptide microcapsules (SBPM). The preparation process was optimized, and the physicochemical properties of SBPM were studied. The results showed that the prepared SBPM was a faint yellow powder with a spherical-like structure, no holes, cracks, or undesirable odors, a characteristic particle size of  $D_{90} < 10 \mu\text{m}$ , and good flowability at the following conditions: wall material ratio (Arabic gum to  $\beta$ -cyclodextrin mass ratio) of 3:1, the core-to-wall ratio of 1:4 (mass ratio), the solid content of 15%, and the monoglyceride content of 0.4%. The encapsulation efficiency of shrimp bioactive peptides reached  $(90.11 \pm 0.23)\%$ . The intermolecular interactions between the shrimp bioactive peptides and the wall materials facilitated the formation of microcapsules. Microencapsulation significantly reduced the hygroscopicity of the shrimp bioactive peptides. After 12 hours of digestion in simulated gastrointestinal fluid, the cumulative release of peptides from SBPM reached 89.82%, indicating good sustained-release performance.

**Key words:** *Penaeus vannamei*; shrimp bioactive peptide; microcapsules; spray-drying; process optimization

引文格式:

吴泽龙, 白锴凯, 何建林, 等. 虾活性肽微胶囊的制备工艺优化及其理化性质[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(4): 100-106.  
WU Zelong, BAI Kaikai, HE Jianlin, et al. Optimization of Preparation Process and Physicochemical Properties of Shrimp Bioactive Peptide Microcapsules[J]. Food Research and Development, 2025, 46(4): 100-106.

基金项目: 福建省海洋经济发展专项资金项目(FJHJF-L-2022-6); 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费(2018013)

作者简介: 吴泽龙(1996—), 男(汉), 硕士研究生, 研究方向: 海洋生物资源开发。

\*通信作者: 洪碧红(1968—), 女(汉), 正高级工程师, 博士, 研究方向: 海洋药物与功能食品开发。

虾副产物(虾头、虾壳等)中富含高价值的生物活性物质,如蛋白质、虾青素、脂质等<sup>[1-2]</sup>。其中,虾源蛋白肽的氨基酸种类齐全、生物活性多样,在抗氧化、降血压、免疫调节等方面具有一定功效<sup>[3-5]</sup>,可用于开发功能性食品和膳食补充剂。然而,虾活性肽存在吸湿性强、稳定性差和易受外界环境影响(如氧化)而变性失活等缺陷,导致其应用受限。

微胶囊化能有效减少氧化、水解等作用对活性肽的影响,较好保护肽活性成分、提高肽稳定性。目前,利用微胶囊技术包埋活性肽的方法主要有锐孔法、复凝聚法、冷冻干燥法及喷雾干燥法等<sup>[6-9]</sup>。前3种方法制备成本较高、应用范围有限,或不适于批量生产,而喷雾干燥法具有生产成本低、连续性好、易于规模化生产等优点<sup>[10]</sup>,是制备活性肽微胶囊的理想方法。天然或合成高分子材料常被用作微胶囊的壁材,特别是天然高分子材料具有生物相容性较好、无毒性、可再生等优势,很适合制备可食性微囊。如阿拉伯胶具有高溶解度、低黏度和良好的乳化性能<sup>[11]</sup>,是良好控释载体; $\beta$ -环糊精价格低,具有外亲水、内疏水的特性,其抗吸湿性、抗结块性强,包埋效果好<sup>[12]</sup>。两者的优良理化性质使其成为制备微胶囊壁材的优选原料,有望用于虾活性肽的微胶囊化包埋。

然而,采用单一壁材进行微胶囊化包埋常暴露出包埋效果不够理想等局限性,难以满足现代食品工业的发展需求<sup>[13]</sup>。相较于单一壁材,采用复合壁材制备的微胶囊的包埋率及稳定性较高,综合性能显著优于单一壁材微胶囊<sup>[14-15]</sup>。为进一步提升包埋效果,本研究以虾活性肽为芯材,以阿拉伯胶与 $\beta$ -环糊精为复合壁材,采用喷雾干燥法制备虾活性肽微胶囊(shrimp bioactive peptide microcapsules, SBPM),并通过单因素与正交试验优化微胶囊的制备工艺,同时研究微胶囊的感官、理化性质、稳定性和模拟体外释放性能等关键技术特征,以期开发低吸湿性、高稳定性的虾活性肽微胶囊提供技术支撑。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

南美白对虾副产物(新鲜虾头虾壳):市售;阿拉伯胶、 $\beta$ -环糊精、麦芽糊精、壳聚糖、单甘酯:河南万邦实业有限公司;三氯乙酸、硝酸钾、丙三醇:西陇化工股份有限公司;考马斯亮蓝:美国 BIO-RAD 公司;牛血清白蛋白:美国 Sigma 公司;溴化钾:美国 PIKE 公司。所用化学试剂均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

Sartorius BSA224S 电子分析天平:赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;RCT digital S025 磁力搅拌器:艾卡仪器设备有限公司;B-290 喷雾干燥仪:瑞士布奇公

司;UV-1780 紫外可见分光光度计:岛津仪器(苏州)有限公司;LS-POP(6)激光粒度分析仪:珠海欧美克仪器有限公司;Tensor 27&Tensor 37 傅里叶变换红外光谱仪:德国布鲁克光谱仪器公司;ZEISS Sigma 扫描电子显微镜:德国卡尔蔡司公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 活性肽的制备

参考文献[4]的方法制备南美白对虾副产物虾活性肽(分子质量分布在 75~1 355 Da 的蛋白肽占比达到 76.35%)。

#### 1.3.2 SBPM 的制备

分别称取适量的复合壁材(阿拉伯胶、 $\beta$ -环糊精、麦芽糊精、壳聚糖),加入去离子水,55℃水浴搅拌助溶,恒温 30 min,加入乳化剂(单甘酯)及虾活性肽继续搅拌 20 min 后,调节转速至 10 000 r/min,高速乳化均质 10 min,得乳化液。乳化液经喷雾干燥(空压机出口压力 0.6 MPa;进样口温度 130℃;进料速率 2.0 mL/min),制得 SBPM。不加入虾活性肽,按照相同方法制备无芯材的空白微胶囊。SBPM 的产率( $Y_1$ ,%)按下列公式计算<sup>[16]</sup>。

$$Y_1 = \frac{m_1}{m_2} \times 100$$

式中: $m_1$ 为喷干后微胶囊的质量,g; $m_2$ 为加入芯壁材的质量,g。

#### 1.3.3 虾活性肽包埋率测定

采用考马斯亮蓝法检测蛋白质含量<sup>[17-18]</sup>。配制终浓度为 10 mg/mL 的 SBPM 溶液,超声辅助提取 15 min 后,离心(8 000 r/min、10 min),取上清液加入 10% 三氯乙酸溶液,漩涡混匀后,室温静置 10 min,再次离心,所得上清液即为肽待测液。按 1.3.2 方法制备无芯材的空白微胶囊,同法处理空白微胶囊后得到的上清液作为对照。2 种溶液的肽含量差值即微胶囊的肽含量,计算微胶囊对虾活性肽的包埋率。包埋率( $Y_2$ ,%)按下列公式计算<sup>[16]</sup>。

$$Y_2 = \frac{m_1 \times m_2}{m_3} \times 100$$

式中: $m_1$ 为微胶囊的质量,g; $m_2$ 为微胶囊的肽含量,mg/g; $m_3$ 为投入的总肽质量,mg。

#### 1.3.4 壁材的筛选

以虾活性肽为芯材,阿拉伯胶为主要壁材,按壁材比(质量比)2:1,将阿拉伯胶分别与 $\beta$ -环糊精、麦芽糊精、壳聚糖进行复配,并在芯壁比(芯材与壁材质量比)1:1 条件下,分别对虾活性肽进行包埋,以微胶囊包埋率、成型效果为考察指标,筛选效果最优的壁材组合。

#### 1.3.5 SBPM 制备单因素试验

以虾活性肽为芯材,阿拉伯胶与 $\beta$ -环糊精为壁材,分别探究壁材比(质量比)、芯壁比(芯材与壁材质

量比)、固形物含量、单甘酯添加量对 SBPM 包埋率及产率的影响。单因素试验因素与水平见表 1。

表 1 单因素试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of single factor experimental

水平	影响因素			
	壁材比	芯壁比	单甘酯添加量/%	固形物含量/%
1	1:1	1:1	0.1	5
2	2:1	1:2	0.2	10
3	3:1	1:3	0.4	15
4	4:1	1:4	0.6	20
5	5:1	1:5	0.8	25

### 1.3.6 SBPM 正交试验设计

在单因素试验基础上,选择壁材比(质量比)、芯壁比(质量比)、固形物含量为考察因素,以微胶囊对虾活性肽的包埋率为主要指标,采用三因素三水平正交试验设计,按  $L_9(3^4)$  正交表进行试验,优化微胶囊制备工艺。因素与水平见表 2。

表 2 正交试验因素与水平

Table 2 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	A 壁材比	B 芯壁比	C 固形物含量/%
1	2:1	1:2	10
2	3:1	1:3	15
3	4:1	1:4	20

### 1.3.7 SBPM 理化指标的测定

#### 1.3.7.1 水分含量

参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》<sup>[19]</sup>的直接干燥法测定水分含量。

#### 1.3.7.2 休止角

取滤纸卷成漏斗状,沿内壁加入微胶囊粉末,从固定高度使微胶囊粉末自由下落,测定堆积体顶点到底面距离( $H$ , cm)与堆积体底面半径( $R$ , cm),休止角( $\alpha$ , °)按下列公式计算。

$$\alpha = \arctan \frac{H}{R}$$

#### 1.3.7.3 堆积密度

称取适量微胶囊粉末  $m$ (g),缓缓加入量筒中,读取其体积为  $V_p$ (mL),堆积密度  $D_p$ (g/m<sup>3</sup>)按下列公式计算。

$$D_p = \frac{m}{V_p}$$

#### 1.3.7.4 粒径分布

取适量微胶囊粉末,加入无水乙醇溶液,用玻璃棒

辅助搅拌,超声振荡 2 min 使样品分散后,采用激光粒度分析仪检测微胶囊的粒径分布情况。

#### 1.3.8 SBPM 形貌观察

取适量微胶囊粉末,均匀分散贴附于样品盘上,用洗耳球吹去浮粉后,经喷金处理后,扫描电子显微镜观测。

#### 1.3.9 SBPM 红外光谱

取约 1 mg 微胶囊粉末与 100 mg 光谱级 KBr 充分研磨、混匀,压片,制成透明薄片,采用傅里叶变换红外光谱仪进行扫描分析,扫描范围为 400~4 000 cm<sup>-1</sup>,仪器分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>,扫描次数 32 次。

#### 1.3.10 SBPM 吸湿性能测定

称量约 1 g 微胶囊粉末放入培养皿中,置于盛有饱和硝酸钾(KNO<sub>3</sub>)溶液的干燥器内(相对湿度 92.5%),于室温下平衡 7 d,吸湿率( $Y_3$ , %)按下列公式计算。

$$Y_3 = \frac{m_1}{m_2} \times 100$$

式中: $m_1$ 为吸收水分的质量,g; $m_2$ 为样品的质量,g。

#### 1.3.11 SBPM 体外缓释性能检测

模拟胃、肠液连续环境(人工胃液和人工肠液参照 2020 年版《中国药典》<sup>[20]</sup>配制),取 1.0 g SBPM 置于释放介质中,在 37 °C、100 r/min 搅拌下恒温消化,定时取样,并补充释放溶液(同温度、等体积)<sup>[21]</sup>;取样,采用考马斯亮蓝法检测肽的含量,释放率( $Y_4$ , %)按下列公式计算。

$$Y_4 = \frac{A_1}{A_2} \times 100$$

式中: $A_1$ 为释放液中多肽的含量,mg/g; $A_2$ 为微胶囊中总肽的含量,mg/g。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 GraphPad Prism 8.0 软件分析处理数据,结果以平均值±标准差表示,显著性分析中不同小写字母表示组间差异显著( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 复合壁材对微胶囊制备效果的影响

固定阿拉伯胶与其他多糖的质量比为 2:1、芯壁比为 1:1(质量比),采用不同复合壁材制备 SBPM,其包埋效果、成型效果见表 3。

表 3 微胶囊壁材筛选结果

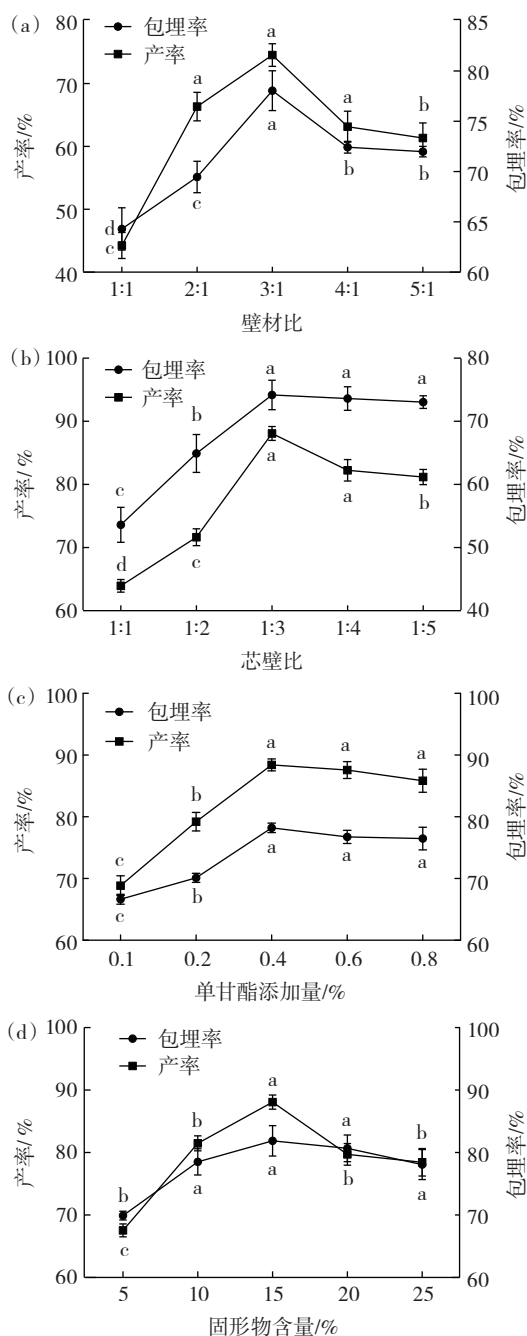
Table 3 Microcapsule wall screening results

壁材比(质量比)	包埋率/%	成型效果
阿拉伯胶:β-环糊精=2:1	58.23±0.20	成型结构松软,粉末颗粒细小且均匀
阿拉伯胶:麦芽糊精=2:1	56.08±0.74	成型结构较坚硬,粉末颗粒大且均匀
阿拉伯胶:壳聚糖=2:1	50.93±0.18	成型结构松软,粉末颗粒小且均匀

由表3可知,综合对比3种复合壁材制备的包埋率和成型效果,阿拉伯胶与 $\beta$ -环糊精的复配效果优于其余两组复合壁材,其包埋率高,能较好保护虾活性肽,且综合成型效果好。因此,选取阿拉伯胶与 $\beta$ -环糊精作为复合壁材,用于后续试验。

### 2.2 单因素试验分析

壁材比、芯壁比、单甘酯添加量、固形物含量对虾活性肽包埋率和产率的影响见图1。



(a)壁材比;(b)芯壁比;(c)单甘酯添加量;(d)固形物含量。同一指标不同小写字母表示具有显著性差异, $P<0.05$ 。

图1 各因素对SBPM包埋率及产率的影响

Fig.1 Effect of various factors on the encapsulation efficiency and yield of SBPM

由图1(a)可知,壁材比为3:1时,阿拉伯胶与 $\beta$ -环糊精具有较好的协同作用,对芯材包埋效果较好、产率较高;继续提高壁材用量,则因囊液浓度上升、黏度变大,不利于喷雾干燥,导致包埋效果变差、产率下降。因此,选取壁材比为2:1、3:1、4:1进行正交试验。

由图1(b)可知,芯壁比对虾活性肽包埋率和产率的影响明显。当芯壁比为1:1时,壁材添加量较少,无法完全包裹芯材,且容易产生囊液分层影响其稳定性,最终导致包埋效果差、产率低。随壁材比例增大,包埋率明显提升,芯壁比为1:3时,包埋率与产率达到最高。此后,进一步提升壁材比例,包埋率无明显上升,但产率下降,原因在于足量的壁材已能够对芯材形成较好包埋效果,进一步增大壁材比例,囊液浓度上升、黏度变大,反而不利于喷雾干燥,导致产率下降。因此,选取芯壁比为1:2、1:3、1:4进行正交试验。

由图1(c)可知,添加量为0.1%~0.4%,增加单甘酯可提高微胶囊包埋率及产率,可见增加乳化剂有利于囊液形成均匀的分散体系。但单甘酯添加量过高,囊液易产生微量絮凝,不利于成囊。因此,选取单甘酯添加量为0.4%进行正交试验。

由图1(d)可知,当固形物含量较低时( $<5\%$ ),囊液较稀,黏度小,对芯材的包埋效果较差。随着固形物含量的增加,囊壁更易形成,微胶囊致密度得到提升,包埋率、产率随之上升。然而,当固形物含量提高到20%~25%时,壁材无法完全溶解,囊液黏度大、流动性差,易堵塞喷嘴或造成粘壁现象。因此,选取固形物含量为10%、15%、20%进行正交试验。

### 2.3 正交试验结果与分析

2.1和2.2试验结果表明,阿拉伯胶与 $\beta$ -环糊精的壁材比为3:1时包埋率和成型效果较好。在此壁材比的基础上,进一步采用正交试验法对芯壁比、壁材比和固形物含量进行优化。正交试验设计与结果见表4。正交试验方差分析见表5。

表4 正交试验设计与结果

Table 4 Orthogonal experimental design and results

编号	A	B	C	空白	包埋率/%
1	1	1	1	1	62.49
2	1	2	2	2	81.44
3	1	3	3	3	82.16
4	2	1	2	3	78.41
5	2	2	3	1	89.10
6	2	3	1	2	84.80
7	3	1	3	2	71.01
8	3	2	1	3	81.66
9	3	3	2	1	88.17
$K_1$	227.09	211.91	228.95	239.76	
$K_2$	252.31	253.20	249.02	238.25	
$K_3$	240.84	255.13	242.27	242.23	



续表4 正交试验设计与结果

编号	A	B	C	空白	包埋率/%
$k_1$	75.70	70.64	76.32	79.92	
$k_2$	84.10	84.40	83.01	79.42	
$k_3$	80.28	85.04	80.76	80.74	
R	8.41	14.41	6.69	1.33	
离差平方和	106.30	397.40	69.53	2.69	
优组合	$A_2B_3C_2$				

表5 正交试验方差分析

Table 5 Orthogonal test analysis of variance

差异源	离差平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
A	106.30	2	53	39.50	0.024 7	*
B	397.40	2	199	147.66	0.006 7	*
C	69.53	2	35	25.84	0.037 3	*
误差	2.69	2	1			
总和	576	8				

注: \*表示影响显著,  $P < 0.05$ 。

由表4和表5可知,各试验因素对微胶囊包埋率影响的主次顺序为芯壁比>壁材比>固形物含量,最佳工艺组合为 $A_2B_3C_2$ ,即壁材比为3:1、芯壁比为1:4、固形物含量为15%。验证试验表明,此条件下微胶囊的平均包埋率为 $(90.11 \pm 0.23)\%$ ,高于任一正交试验组合,包埋效果良好。

#### 2.4 SBPM的形貌

采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观测SBPM的微观结构,结果见图2。

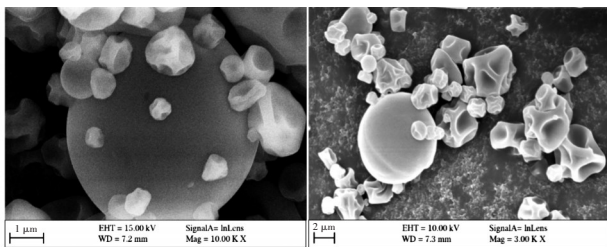


图2 SBPM的扫描电子显微图像

Fig.2 The micro-morphology of SBPM observed by scanning electron microscopy (SEM)

在最佳工艺下制备的SBPM为细腻的淡黄色粉末,无不良气味。由图2可知,SBPM表面皱缩凹陷,近似球形,也有部分SBPM为表面光滑的规整球体。出现表面皱缩凹陷,可能与喷雾干燥过程中的高温导致液滴迅速蒸发有关。此外,部分SBPM发生聚集,成团分布,可能与壁材特性(如阿拉伯胶多糖量高、易吸水)有关;壁材含量较高,则可能进一步增强这种聚集倾向。整体而言,SBPM的微胶囊表面连续且完整,无孔洞、开裂等现象,能够较好地保护芯材。

#### 2.5 SBPM的粒度分布、流动性和水分含量

采用激光粒度仪检测SBPM的粒度分布情况,结果见图3。

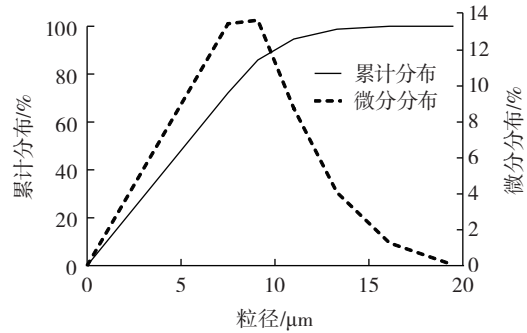


图3 SBPM的粒径分布

Fig.3 Particle size distribution of SBPM

由图3可知,90%以上的SBPM粒径小于 $10 \mu\text{m}$ ,即SBPM的 $D_{90} < 10 \mu\text{m}$ ,且大部分SBPM的粒径集中在 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ ,表明所制SBPM粉末较为细腻、分布较均匀。休止角试验和堆密度试验的结果表明,SBPM的堆积密度为 $(0.36 \pm 0.02) \text{g}/\text{m}^3$ ,休止角为 $(50.19 \pm 0.33)^\circ$ ,可见所制微胶囊之间相对松散且流动性良好。微胶囊的水分含量会影响产品的储藏期限,特别是含水量过高时,产品易发黏、结块甚至产生霉变。而SBPM含水量仅为 $(4.77 \pm 0.19)\%$ ,含水量较低,不易发黏。

#### 2.6 SBPM的红外光谱

SBPM、虾活性肽、 $\beta$ -环糊精及阿拉伯胶的傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)见图4。

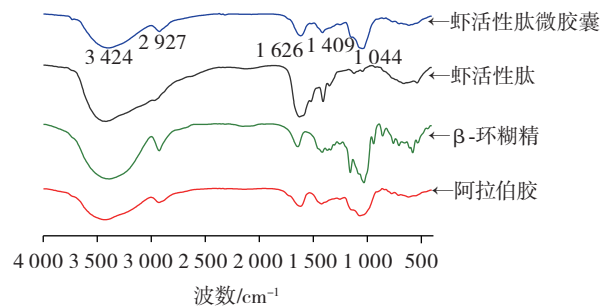


图4 SBPM的傅里叶变换红外光谱图

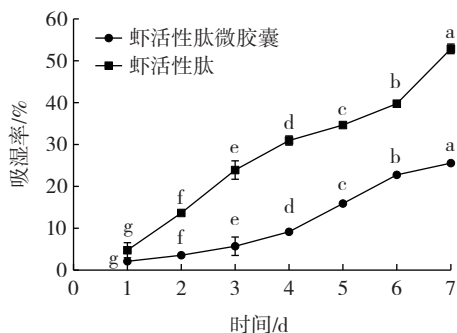
Fig.4 Fourier transform infrared spectrum of SBPM

采用傅里叶变换红外光谱技术研究SBPM各成分之间的相互作用,有利于揭示SBPM的形成过程。由图4可知,微胶囊在 $1044 \text{cm}^{-1}$ (C—O伸缩振动)、 $1409 \text{cm}^{-1}$ (—CH<sub>3</sub>弯曲振动)、 $1626 \text{cm}^{-1}$ (酰胺I带C=O伸缩振动)、 $2927 \text{cm}^{-1}$ (—CH<sub>2</sub>)和 $3424 \text{cm}^{-1}$ 峰(O—H伸缩振动)等处出现典型吸收峰。 $1000 \sim 1300 \text{cm}^{-1}$ 的吸收峰来自氨基酸残基的C—O伸缩振动和羟基C—O—H弯曲振动<sup>[22]</sup>,可观察到 $1044 \text{cm}^{-1}$ 峰强度明显增强,可能与虾活性肽成囊增强了分子振动的偶极矩和振动强度有关。与虾活性肽相比,SBPM在 $1626 \text{cm}^{-1}$

和  $1409\text{ cm}^{-1}$  处振动峰的强度明显减弱;SBPM 在  $3424\text{ cm}^{-1}$  处出现单强峰,与纯  $\beta$ -环糊精相比,该吸收峰变宽并出现蓝移。以上结果表明,虾活性肽与壁材在共混过程中,二者之间存在分子间相互作用,也佐证虾活性肽被成功包埋在壁材中。

### 2.7 SBPM 的吸湿性能分析

对比虾活性肽与微胶囊在高湿环境中的吸湿情况,评估微囊化对虾活性肽吸湿性的影响。累积吸湿曲线如图 5 所示。



同一指标不同小写字母表示具有显著性差异,  $P < 0.05$ 。

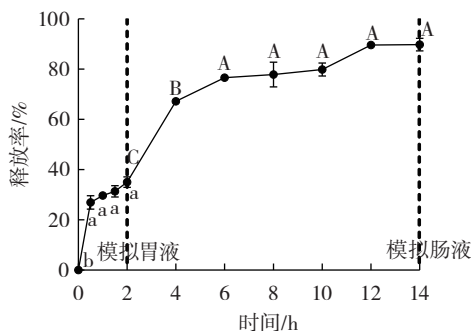
图 5 虾活性肽与 SBPM 在高湿环境中的累积吸湿曲线

Fig.5 Cumulative moisture absorption curves of shrimp bioactive peptides and SBPM in high-humidity environment

由图 5 可知,未微囊化的虾活性肽粉易吸湿,在高湿环境(相对湿度  $92.5\%$ )中的吸湿率明显高于 SBPM;贮藏第 7 天,未微囊化的虾活性肽吸湿率为  $(52.87 \pm 0.46)\%$ ,而 SBPM 的吸湿率仅为  $(25.55 \pm 0.22)\%$ 。部分原因在于经喷雾干燥法制备的 SBPM 表面相对致密,不易吸潮。由此可见,微囊化可减少虾活性肽粉的吸湿性,有利于虾活性肽保持稳定。

### 2.8 SBPM 的体外模拟消化

采用人工胃液和人工肠液,在体外模拟 SBPM 依次经历胃液消化和肠液消化的过程,检测释放到消化液中的肽含量,探讨 SBPM 在模拟胃肠液中的连续释放特性,结果见图 6。



同一消化阶段不同字母表示具有显著性差异,  $P < 0.05$ 。

图 6 SBPM 在模拟胃肠液中的连续释放曲线

Fig.6 Continuous release profile of SBPM in simulated gastrointestinal fluid

由图 6 可知,SBPM 壁材为多糖,易受胃液酸性环境及消化酶的影响,导致蛋白质泄露,而且复合壁材组分(阿拉伯胶与  $\beta$ -环糊精)在特定 pH 值环境下具有低 pH 值收缩、高 pH 值溶胀的特性<sup>[23]</sup>。因此,在酸性条件下,微胶囊的复合壁材易受到破坏,导致前期芯材的释放率较高。而在肠液消化过程,微胶囊发生溶胀,此时囊壁表面孔隙变小,芯材释放受阻,因此释放速率降低。SBPM 在胃液消化作用 2 h 仅释放  $35.03\%$ ,再经 12 h 的模拟肠液消化后累计释放量可达  $89.82\%$ ,表明以阿拉伯胶与  $\beta$ -环糊精为复合壁材具有较好的缓释效果,可在胃肠道环境中缓慢释放虾活性肽。

### 3 结论

本研究以南美白对虾副产物(虾头、虾壳)提取的活性肽为原料,采用喷雾干燥法制备 SBPM,以微胶囊包埋率及产率为评价指标,经壁材的筛选、单因素试验和正交试验,建立 SBPM 的优化制备工艺条件:壁材比 3:1(阿拉伯胶与  $\beta$ -环糊精的质量比)、芯壁比 1:4(质量比)、固形物含量  $15\%$ 、单甘酯添加量  $0.4\%$ 。在优化工艺条件下制备的 SBPM 呈淡黄色粉末,为表面皱缩或光滑的类球状微囊,粒径小于  $10\ \mu\text{m}$  的微囊占比高于  $90\%$ ,分散性佳、流动性较好,含水量低至  $(4.77 \pm 0.19)\%$ ,不易发黏,且对虾活性肽的平均包埋率可达  $(90.11 \pm 0.23)\%$ 。SBPM 的形成系壁材和芯材分子间相互作用的结果,其微囊表面连续、完整且致密,无孔洞、开裂等现象,能有效减少高湿(相对湿度  $92.5\%$ )对虾活性肽的破坏,提高虾活性肽的稳定性,并可实现虾活性肽在模拟胃、肠液中缓慢释放,具有较好的缓释性能。SBPM 的相关研究结果拓展了微囊化技术在虾活性肽的应用范围,为开发功能性虾活性肽产品提供有力的技术支撑。

### 参考文献:

- GULZAR S, RAJU N, CHANDRAGIRI NAGARAJARAO R, et al. Oil and pigments from shrimp processing by-products: Extraction, composition, bioactivities and its application-A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 100: 307-319.
- CAHÚ T B, SANTOS S D, MENDES A, et al. Recovery of protein, chitin, carotenoids and glycosaminoglycans from Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) processing waste[J]. Process Biochemistry, 2012, 47(4): 570-577.
- FENG S M, LIMWACHIRANON J, LUO Z S, et al. Preparation and purification of angiotensin-converting enzyme inhibitory peptides from hydrolysate of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) shell waste[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2016, 51(7): 1610-1617.
- 吴泽龙,何建林,白锴凯,等.南美白对虾副产物酶解工艺优化及其蛋白肽活性评价[J].应用海洋学学报,2023,42(3):495-506. WU Zelong, HE Jianlin, BAI Kaikai, et al. Optimization of enzymatic digestion process of *Penaeus vannamei* by-products and the bioactivity evaluation of the enzymatic hydrolysates[J]. Journal of

- Applied Oceanography, 2023, 42(3): 495-506.
- [5] WU D, SUN N, DING J, et al. Evaluation and structure-activity relationship analysis of antioxidant shrimp peptides[J]. Food & Function, 2019, 10(9): 5605-5615.
- [6] 袁靖琳, 陈燊, 韦翠兰, 等. 锐孔法制备水牛乳活性肽微胶囊工艺优化及体外释放研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(8): 227-232, 238.  
YUAN Jinglin, CHEN Yu, WEI Cuilan, et al. Optimization of preparation process of buffalo milk active peptides microspheres by piercing method and *in vitro* releasing behavior of the microcapsules[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(8): 227-232, 238.
- [7] CALDERÓN - OLIVER M, PEDROZA - ISLAS R, ESCALONA - BUENDÍA H B, et al. Comparative study of the microencapsulation by complex coacervation of nisin in combination with an avocado antioxidant extract[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 62: 49-57.
- [8] 尹乐斌, 刘娅丽, 何平, 等. 大豆多肽微胶囊的制备及抗氧化活性研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(2): 116-120.  
YIN Lebin, LIU Yali, HE Ping, et al. Preparation and antioxidant activity of soybean polypeptide microcapsules[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(2): 116-120.
- [9] 郭鑫, 刘雪坤, 杜锐. 梅花鹿鹿尾多肽微胶囊的制备及体外释放性能研究[J]. 时珍国医国药, 2022, 33(6): 1354-1357.  
GUO Xin, LIU Xuekun, DU Rui. Preparation and *in vitro* release of peptide microcapsules from Sika Deer tail[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2022, 33(6): 1354-1357.
- [10] SAMBORSKA K, BOOSTANI S, GERANPOUR M, et al. Green biopolymers from by-products as wall materials for spray drying microencapsulation of phytochemicals[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 108: 297-325.
- [11] DE BARROS FERNANDES R V, BORGES S V, BOTREL D A. Influence of spray drying operating conditions on microencapsulated rosemary essential oil properties[J]. Ciência e Tecnologia De Alimentos, 2013, 33: 171-178.
- [12] SZENTE L, SZEJTLI J. Cyclodextrins as food ingredients[J]. Trends in Food Science & Technology, 2004, 15(3/4): 137-142.
- [13] 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.  
ZHUO Zuyou, SONG Shengnan, BAI Xiaojie, et al. Applications of natural polymer as microcapsule wall material[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(15): 112-121.
- [14] 朱启鹏, 李晓东, 刘璐, 等. 微胶囊化生姜、枸杞、栀子提取物的ACE抑制率、苦味及稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(22): 47-54.  
ZHU Qipeng, LI Xiaodong, LIU Lu, et al. ACE inhibitory rate, bitterness and stability of microencapsulated extracts of ginger, Chinese wolfberry and *Gardenia jasminoides*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(22): 47-54.
- [15] PAULA D A, MARTINS E M F, COSTA N A, et al. Use of gelatin and gum Arabic for microencapsulation of probiotic cells from *Lactobacillus plantarum* by a dual process combining double emulsification followed by complex coacervation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 133: 722-731.
- [16] 鲁伟, 任国谱, 宋俊梅. 蛋白水解液中多肽含量的测定方法[J]. 食品科学, 2005, 26(7): 169-171.  
LU Wei, REN Guopu, SONG Junmei. Determination of content of peptides in protein hydrolysates[J]. Food Science, 2005, 26(7): 169-171.
- [17] 吴光杰, 李玉萍, 陈美琴, 等. 马齿苋多糖蛋白含量测定及脱蛋白方法研究[J]. 时珍国医国药, 2015, 26(7): 1577-1579.  
WU Guangjie, LI Yuping, CHEN Meiqin, et al. Study on determination of protein in polysaccharides from *portulaca oleracea* L. and deproteinization methods[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2015, 26(7): 1577-1579.
- [18] 郑颖. 蛋清蛋白抗氧化肽的酶法制备、微胶囊化及生物活性评价[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.  
ZHENG Ying. Enzymatic preparation, microencapsulation and biological activity evaluation of antioxidant peptides from egg white protein[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
The National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National standard for food safety Determination of moisture in food: GB 5009.3—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [20] 国家药典编委会. 中华人民共和国药典[M]. 2020年版. 北京: 中国医药技术出版社, 2015: 472-474.  
Chinese Pharmacopoeia Commission. Chinese pharmacopoeia[M]. 2020 ed. Beijing: China Medical Technology Press, 2015: 472-474.
- [21] 张杰. 蛋白类药物海藻酸盐微胶囊的制备及体外释放行为的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.  
ZHANG Jie. Preparation and *in vitro* release behavior of protein drug alginate microcapsules[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [22] 戚亭, 陈雪忠, 刘志东, 等. 响应面优化的南极磷虾蛋白磷酸化改性工艺[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(1): 204-210.  
QI Ting, CHEN Xuezhong, LIU Zhidong, et al. Phosphorylation process of Antarctic krill protein with response surface optimization[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(1): 204-210.
- [23] 谢海伟, 方远见, 吴礼珠, 等. 鲨素肽微胶囊的制备工艺及性能研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(9): 112-116, 122.  
XIE Haiwei, FANG Yuanjian, WU Lizhu, et al. Preparation and characterization of microencapsulation of tachyplesin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(9): 112-116, 122.

加工编辑: 刘艳美  
收稿日期: 2023-11-07