

# 肉桂醛微胶囊的制备、表征及缓释性研究

杨紫珊<sup>1</sup>, 许洛杰<sup>1</sup>, 毛吉甜<sup>1</sup>, 王君昇<sup>1</sup>, 仝智强<sup>2</sup>, 王瑶<sup>2</sup>, 张明月<sup>1</sup>, 彭军仓<sup>2\*</sup>, 刘鹏飞<sup>1\*</sup>

(1. 河南农业大学烟草学院, 河南 郑州 450046;

2. 陕西中烟工业有限责任公司技术中心, 陕西 宝鸡 710016)

**摘要:**为解决肉桂醛在空气中易被氧化、有一定刺激性气味等问题,以肉桂醛为芯材、壳聚糖(CS)与聚乙二醇(PEG)为复合壁材,采用冷冻干燥法制备肉桂醛微胶囊。针对PEG添加量、芯材质量分数、交联剂用量这3种影响微胶囊负载率的因素,对肉桂醛微胶囊的制备工艺进行正交试验优化。确定最佳工艺条件为:PEG添加量1.50 g、芯材质量分数5.0%、交联剂用量0.50 g,此时微胶囊负载率为20.89%。采用FT-IR、SEM、TEM、TGA对最优条件下制备的肉桂醛微胶囊进行表征,并对其缓释性能进行分析研究,为肉桂醛在烟草加香方面及在现代食品工业生产中的应用提供参考。

**关键词:**肉桂醛;聚乙二醇;壳聚糖;微胶囊;缓释

中图分类号:TS201.2

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S1-0343-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S1.062

## Study on preparation, characterization and slow-release performance of cinnamaldehyde microcapsules

YANG Zi-shan<sup>1</sup>, XU Luo-jie<sup>1</sup>, MAO Ji-tian<sup>1</sup>, WANG Jun-sheng<sup>1</sup>, TONG Zhi-qiang<sup>2</sup>,  
WANG Yao<sup>2</sup>, ZHANG Ming-yue<sup>1</sup>, PENG Jun-cang<sup>2\*</sup>, LIU Peng-fei<sup>1\*</sup>

(1. College of Tobacco, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China;

2. Technology Center, China Tobacco Shaanxi Industrial Co., Ltd., Baoji 710016, China)

**Abstract:** To solve the problems of cinnamaldehyde, such as being oxidized easily and having a certain irritating odor in the air, and expand its application range, cinnamaldehyde microcapsules are prepared via freeze-drying method with cinnamaldehyde as the core material, chitosan (CS) and polyethylene glycol (PEG) as wall materials. Three factors affecting microcapsule loading rate, including PEG addition amount, cinnamaldehyde concentration, and cross-linking agent dosage, are optimized through orthogonal test by taking the loading rate of microcapsule as indicator. The optimal process parameters are determined as follows: PEG addition is 1.50 g, cinnamaldehyde concentration is 5.0%, and cross-linking agent dosage is 0.50 g, under which the microcapsule loading rate reaches 20.89%. Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), and thermogravimetric analysis (TGA) are employed to characterize the cinnamaldehyde microcapsules prepared under optimal conditions, and their slow-release properties are analyzed and studied. This study aims to provide reference for the application of cinnamaldehyde in tobacco flavoring and modern food production.

**Key words:** cinnamaldehyde; polyethylene glycol; chitosan; microcapsules; slow-release

肉桂醛(Cinnamaldehyde)是一种天然存在于斯里兰卡肉桂油、桂皮油、藿香油、风信子油和玫瑰油等精油中的醛类有机化合物<sup>[1]</sup>,其外观为黄色黏稠状液体,有温和辛香气息<sup>[2]</sup>,肉桂醛作为一种香料,被广泛用于调味香料、烘焙食品和饮料中<sup>[3]</sup>。肉桂醛具备抗菌、抗炎、抗氧化和免疫调节等多种生物学活性,在医学领域有着重要用途<sup>[4]</sup>,但由于肉桂醛分子中存在碳碳双键和醛基,因此在空气中容易被氧化,且肉桂醛具有一定刺激性气味,直接应用到食

品中会影响食品的风味<sup>[5]</sup>。使用微胶囊技术是解决肉桂醛上述问题的手段之一,既可以改善肉桂醛的溶解性、防止其氧化、免受环境温度光照等影响,也可以使肉桂醛缓慢释放,达到持续抑菌和保持持久香气的目的<sup>[6]</sup>。赵佳轩<sup>[7]</sup>发现用壳聚糖/透明质酸钠包埋茶树精油后可以显著增强茶树精油的抑菌强度。程书瑾等<sup>[8]</sup>用单硬脂酸甘油酯与辛烯基琥珀酸淀粉钠为壁材包埋L-薄荷醇,制备出结构完整、具有良好的释放性能的温敏型L-薄荷醇微

收稿日期:2025-01-07;修回日期:2025-03-24

基金项目:河南省科技研发计划联合基金(222103810005);河南省高等学校重点科研项目(23A210022);陕西中烟科技项目(2023610000340221)

作者简介:杨紫珊(1999-),女,硕士生,研究方向为香精香料的制备与应用,18737291528@163.com;彭军仓(1973-),男,硕士,工程师,主要研究方向为香精香料剖析与质量控制、新型烟草制品,通讯联系人,pjc126@sina.com;刘鹏飞(1981-),男,博士,教授,硕士生导师,研究方向为烟草化学、烟草香料与保润,通讯联系人,liupengfei523@126.com。

胶囊。

聚乙二醇(PEG)因具有良好的生物可降解性和生物相容性,被广泛地应用在药物制剂、医疗卫生和食品化工等众多领域中<sup>[9-10]</sup>。阎瑾等<sup>[11]</sup>以甜橙香精为芯材,六亚甲基二异氰酸酯三聚体、PEG 和石墨烯作为壁材制备的微胶囊可以避免香精过快释放,从而达到缓释的目的。壳聚糖(CS)具有良好的吸附性,且含有大量的羟基和氨基,用 CS 作为壁材制作的微胶囊稳定性较高<sup>[12]</sup>,并能控制香料的缓慢释放。CS 与 PEG 结合,既能保持 CS 的天然特性,还能使其具有更好的水溶性和结合有机化合物的能力<sup>[13-15]</sup>,且制作工艺较为简单,生产成本较低,为减缓肉桂醛的释放速率、拓宽肉桂醛的应用空间及进一步开发新型肉桂醛微胶囊提供了参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

CS:脱乙酰度 $\geq 95\%$ ,粘度 100~200 mPa·s,上海麦克林生化科技有限公司;PEG 6000:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;吐温 80:化学纯,天津市富宇精细化工有限公司;肉桂醛:纯度 99%,上海麦克林生化科技有限公司;三聚磷酸钠:分析纯,天津市瑞金特化学品有限公司。

UV1800PC 紫外-可见分光光度计:上海菁华科技仪器有限公司;SCIENTZ-10N/A 冷冻干燥机:宁波新芝生物科技股份有限公司;Nicolet iS50 傅里叶变换红外光谱仪:美国 Thermo 公司;热重分析仪:瑞士 METTLER TOLEDO 公司;ZEISS Sigma 300 扫描电子显微镜:德国蔡司公司;Tecnai G2 F20 200 kV 场发射透射电镜:美国捷克 FEI 公司;SC-3614 低速离心机:安徽中科中佳科学仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 肉桂醛微胶囊的制备

对张明洋等<sup>[15]</sup>和王帅等<sup>[16]</sup>的实验方法稍作修改:将 CS 加入到 1%的醋酸溶液中搅拌 3 h,使 CS 完全溶解后加入 PEG,继续搅拌 1 h 直至溶液透明。用 1%的氢氧化钠溶液调节 pH 为 5.0,加入体积分数为 1%的吐温 80 后加入肉桂醛,持续搅拌 1 h。在室温超声处理下向混合溶液中添加 0.5 g 三聚磷酸钠。将混合溶液离心,用含有乳化剂的蒸馏水洗 3 次后冷冻干燥,得到负载肉桂醛的微胶囊。

#### 1.2.2 单因素实验

确定 CS 浓度为 1%和乳化剂添加量为 0.50 mL 等条件不变的情况下,以微胶囊的负载率为指标,对

PEG 添加量(0.50、0.75、1.00、1.25、1.50 g)、芯材质量分数(2.0%、3.0%、4.0%、5.0%、6.0%)、交联剂用量(0.25、0.50、0.75、1.00、1.25 g)3 种因素进行控制变量实验。

#### 1.2.3 正交试验设计

在单因素实验的基础上,以负载率为评价指标,选择 PEG 添加量(A)、芯材质量分数(B)、交联剂用量(C)3 个因素为考察对象,每因素设置 3 水平,实验设计如表 1 所示。通过正交试验对肉桂醛微胶囊的制备工艺进行优化。

表 1 正交实验因子水平表

水平	因素		
	PEG 添加量 (A)/g	芯材质量分数 (B)/%	交联剂用量 (C)/g
1	0.50	4	0.25
2	1.00	5	0.50
3	1.50	6	0.75

#### 1.2.4 标准工作曲线的绘制

取 PEG 和肉桂醛各 0.02 g 溶于无水乙醇并定容至 100 mL;取 0.02 g CS 溶于甲醇中,定容至 100 mL,以各自溶剂作为空白对照,确定肉桂醛的最大吸收波长。

以乙醇为溶剂分别配置 0.02、0.03、0.04、0.05、0.06 mg/mL 的肉桂醛,用乙醇为空白对照,在肉桂醛的最大吸收波长处测定吸光度,以吸光度为纵坐标、肉桂醛浓度为横坐标绘制标准曲线。

#### 1.2.5 微胶囊对芯材的负载率、释放率

取 0.05 g 微胶囊于 50 mL 容量瓶中,用乙醇定容后在室温下超声 15 min,静置 8 h 后测定其吸光度,根据肉桂醛标准曲线计算出微胶囊中芯材质量。

芯材的负载率参考王卉等<sup>[17]</sup>的计算方法,并稍做修改。

$$\text{芯材负载率 \%} = \frac{\text{微胶囊中芯材质量}}{\text{微胶囊质量}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{释放率 \%} = \frac{[(\text{初始微胶囊中芯材质量} - \text{微胶囊芯材剩余质量}) / \text{初始微胶囊中芯材质量}] \times 100\% \quad (2)$$

#### 1.2.6 傅里叶变换红外表征

称取一定质量的样品和溴化钾粉末混合研磨均匀后压片,测试分辨率为  $4 \text{ cm}^{-1}$ ,扫描次数为 64 次,通过傅里叶变换红外光谱仪分析官能团情况。

#### 1.2.7 微胶囊形貌测定

扫描电镜(SEM):取少量微胶囊样品均匀粘在

导电胶上,10 mA 电流下喷金处理 120 s,用扫描电镜观察微胶囊的表面形貌。

透射电镜 (TEM):称取 0.10 g 微胶囊粉末样品,加入至 10.0 mL 无水乙醇中,超声分散均匀后滴加在铜网上,采用透射电子显微镜观察微胶囊的结构和形貌。

### 1.2.8 微胶囊热稳定分析

取样品(3~5 mg)放入到小坩埚中,设置热重分析仪参数温度范围 40~500℃,升温速度 10℃/min,载气为氮气,速率为 10 mL/min,测定样品的热释放曲线。

### 1.2.9 微胶囊缓释性分析

称取一定质量的肉桂醛和肉桂醛微胶囊放置于 80℃ 的烘箱中,每间隔 1 h 进行一次吸光度记录,计算样品中芯材质量。

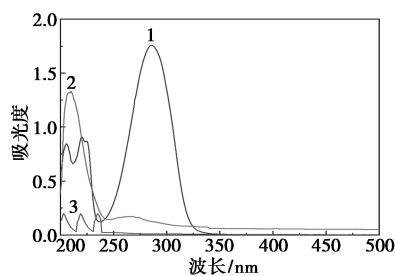
### 1.3 数据处理

每个实验均进行 3 次平行实验,结果取均值,利用 Excel 进行数据分析、Origin 2019 进行数据绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 肉桂醛标准曲线

如图 1 所示,肉桂醛在 286 nm 波长处有着明显的吸收峰,这和李宇伟等<sup>[18]</sup> 研究结果类似。CS 在 286 nm 波长处的吸光度非常小以至于可以忽略,而 PEG 在此处没有吸收峰。因此将肉桂醛的最大吸收波长确定为 286 nm。



1—肉桂醛;2—CS;3—PEG

图 1 200~500 nm 波段吸光度扫描结果

以肉桂醛浓度为横坐标,不同浓度肉桂醛在 286 nm 处的吸光度为纵坐标来绘制标准工作曲线。标准曲线方程为: $y = 20.51x - 0.2194$ ,  $R^2 = 0.9968$ 。

### 2.2 单因素结果分析

#### 2.2.1 PEG 添加量对肉桂醛微胶囊负载率的影响

常温下,当 CS 浓度为 1.0%、乳化剂用量为 0.50 mL 时,确保芯材质量分数和交联剂用量两个因素不变,分别选用 0.50、0.75、1.00、1.25、1.50 g

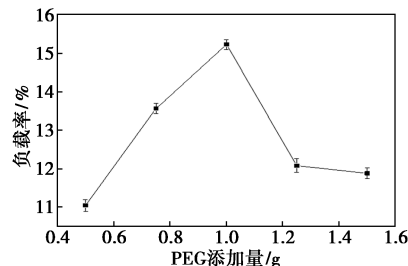
添加量的 PEG 来制备微胶囊。PEG 添加量对肉桂醛微胶囊负载率的影响如图 2(a) 所示。由图可知,当 PEG 用量为 1.00 g 时,微胶囊的负载率最大,为 15.21%。当 PEG 添加量低于 1.00 g 时,由于溶液里的有效分子较少,壁材与芯材形成的三维结构较少,导致微胶囊负载率较低;随着 PEG 添加量的提高,有效分子数量不断增加,分子间间距缩小,分子内部发生相互作用,使得负载率也逐渐变大。但是 PEG 浓度过高(>1 g)会使体系粘度增加,影响后续喷雾干燥过程,从而导致负载率降低<sup>[19]</sup>。

#### 2.2.2 芯材质量分数对肉桂醛微胶囊负载率的影响

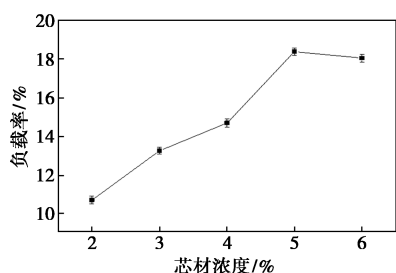
常温下,当 CS 浓度为 1.0%、乳化剂用量为 0.50 mL 时,确保 PEG 添加量和交联剂用量两个因素不变,分别选用 2.0%、3.0%、4.0%、5.0%、6.0% 质量分数的芯材来制备微胶囊。芯材质量分数对肉桂醛微胶囊负载率的影响如图 2(b) 所示。随着芯材质量分数的增加,微胶囊的负载率逐渐增大,当芯材质量分数为 5% 时,微胶囊负载率最高,为 18.38%。原因可能是当芯材质量分数较低时,芯材可以被充足的壁材包覆,不易破损漏出,而当芯材质量分数增大到一定程度时,体系中包埋芯材所需的壁材不够,甚至无法完好地包埋芯材,容易泄露,从而导致微胶囊负载率降低<sup>[20]</sup>。

#### 2.2.3 交联剂用量对肉桂醛微胶囊负载率的影响

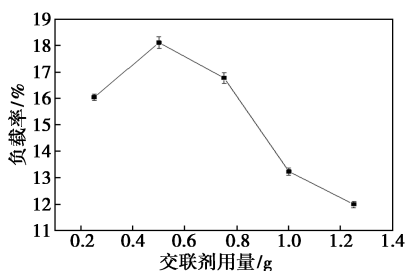
常温下,当 CS 浓度为 1.0%、乳化剂用量为 0.50 mL 时,确保 PEG 添加量和芯材质量分数两个因素不变,分别选用 0.25、0.50、0.75、1.00、1.25 g 的交联剂来制备微胶囊。交联剂用量对肉桂醛微胶囊负载率的影响如图 2(c) 所示,微胶囊负载率随着交联剂的用量先增加后减少。当交联剂用量为 0.50 g 时,微胶囊负载率最高,为 18.12%。其原因可能是在交联剂用量低于 0.50 g 时,体系内交联剂量少导致壁材与芯材交联不完全,形成的微胶囊结构比较柔软;而当交联剂浓度过高时则导致成型迅速,体系粘稠度增大,不利于干燥,从而导致微胶囊负载率降低<sup>[21]</sup>。



(a) PEG 添加量对微胶囊负载率的影响



(b) 芯材质量分数对微胶囊负载率的影响



(c) 交联剂用量对微胶囊负载率的影响

图 2 不同单因素对微胶囊负载率的影响

### 2.3 正交实验分析

在单因素实验的基础上,选取 PEG 添加量(A)、芯材质量分数(B)、交联剂用量(C)这 3 个对负载率有显著影响的因素设计的正交实验结果见表 2。

表 2 正交实验设计表及实验结果

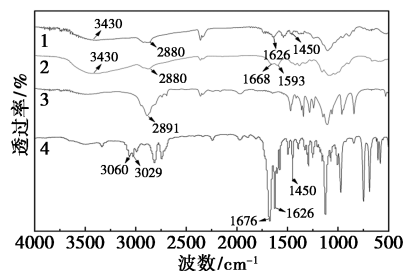
序号	因素			负载率/%
	A	B	C	
1	3	3	1	21.29
2	1	2	3	13.34
3	3	1	3	8.16
4	1	3	2	15.07
5	2	3	3	13.93
6	3	2	2	15.39
7	2	2	1	8.82
8	2	1	2	16.55
9	1	1	1	13.23
K1	41.64	36.94	43.34	
K2	37.30	37.55	47.01	
K3	44.84	50.29	35.43	
k1	13.88	12.31	14.45	
k2	12.43	12.52	15.67	
k3	14.95	16.76	11.81	
R	2.52	4.45	3.86	

由表 2 可知,极差 R 从高到低的顺序是 B>C>A,即各个因素对负载率影响的程度从大到小依次

为:芯材质量分数、交联剂用量、PEG 添加量。经综合分析,确定最佳组合为 A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>,即 PEG 添加量为 1.50 g、芯材质量分数为 5.0%、交联剂用量为 0.50 g。对最佳组合 A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub> 进行验证实验,平行实验 3 次,测得微胶囊的平均负载率为 20.89%,与正交试验中最佳组合负载率相近,这表明较佳组合 A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub> 制备肉桂醛微胶囊的工艺条件是可取的。

### 2.4 红外光谱分析

从图 3 可知,CS 在 3 400 cm<sup>-1</sup>附近呈现出氨基 N—H 的伸缩振动峰,1 533 cm<sup>-1</sup>处为 C—N 的伸缩振动峰<sup>[22]</sup>,1 645 cm<sup>-1</sup>处为乙酰基特征峰,1 090 cm<sup>-1</sup>处为—CH<sub>3</sub> 对称变形振动以及 C—O 骨架振动吸收峰<sup>[23]</sup>。PEG 在 3 430 cm<sup>-1</sup>处为 O—H 的伸缩振动峰<sup>[24]</sup>,1 342、1 280、1 110 cm<sup>-1</sup>处为 PEG 的红外吸收特征峰<sup>[25]</sup>。肉桂醛在 1 500~1 800 cm<sup>-1</sup>范围内有两个尖锐的强吸收峰,在 1 626、1 676 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰分别对应苯环与醛基的伸缩振动吸收峰,在 2 810、2 740 cm<sup>-1</sup>处为醛基—CH 的伸缩振动吸收峰<sup>[26-27]</sup>。从肉桂醛微胶囊的红外图谱中可以看出,在 1 500~1 800 cm<sup>-1</sup>范围内肉桂醛的特征峰发生红移,在 2 810 cm<sup>-1</sup>附近的醛基特征峰明显减弱甚至消失<sup>[28]</sup>,而在 2 880 cm<sup>-1</sup>处出现了 CS 的特征峰,且在 1 110、1 280 cm<sup>-1</sup>处呈现出 PEG 的特征峰,这些现象表明肉桂醛被成功包埋进微胶囊中。

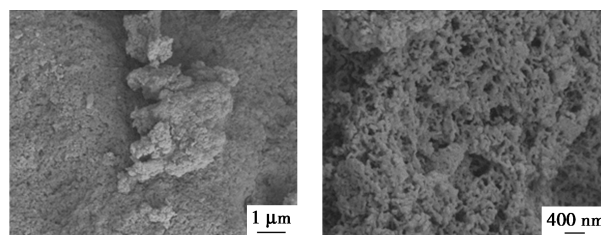


1—肉桂醛微胶囊;2—壳聚糖;3—PEG;4—肉桂醛

图 3 原料及微胶囊的红外光谱图

### 2.5 肉桂醛微胶囊形态表征

由 SEM 图像(见图 4)可以看出,当放大 10 k 倍



(a) 10 k 倍

(b) 20 k 倍

图 4 微胶囊颗粒扫描电镜图

与 20 k 倍时,微胶囊表面有明显的球形凸起,其排列紧密且相互之间有粘连,这可能是由于 CS 与 PEG 之间的相互作用,同时样品中未交联的 CS 也会导致微胶囊之间的粘连<sup>[29]</sup>。壁材表面出现的明显塌陷可能是由于微胶囊在冷冻干燥过程中表面水分挥发导致<sup>[30]</sup>。

由 TEM 图像(见图 5)可以看出,微胶囊呈边缘光滑的球形,且大小较为均匀。此外,还有少量未包埋的壁材和芯材游离在微胶囊周围<sup>[31]</sup>。

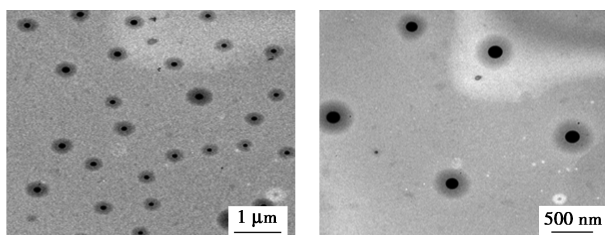
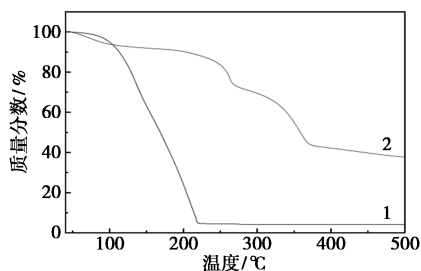


图 5 微胶囊颗粒透射电镜图

## 2.6 肉桂醛微胶囊热稳定分析

肉桂醛与肉桂醛微胶囊的热分解过程如图 6 所示,可以看出肉桂醛在 90℃ 时开始挥发,且速率较快。肉桂醛在微胶囊化前总质量损失高达 94.58%,而被壁材包裹的肉桂醛微胶囊总质量损失降低至 62.33%。肉桂醛微胶囊的质量损失主要分为以下阶段:①50~100℃ 时,微胶囊质量损失约 5.8%,可能是由于微胶囊中结合水与表面水分的损失所致;②当温度升至 200℃ 以上时,CS 与 PEG 的复合壁材之间分子结构开始破裂,此时肉桂醛开始挥发,此阶段微胶囊失重 30.59%;③300~400℃ 时,微胶囊质量损失较为明显,随着温度持续升高,微胶囊壁材持续分解,导致肉桂醛持续损失和挥发,最后壁材碳化。该热重结果与赵厚菲等<sup>[32]</sup>的研究一致,即肉桂醛微胶囊的挥发温度比未被微胶囊壁材包裹的单一肉桂醛的挥发温度更高 M、肉桂醛经微胶囊化后具有更强的热稳定性。



1—肉桂醛;2—肉桂醛微胶囊

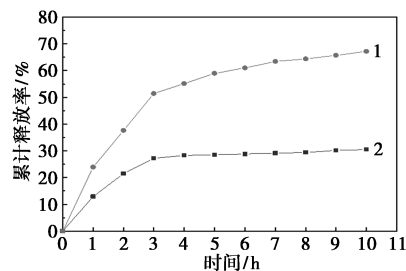
图 6 热重曲线图谱

## 2.7 微胶囊缓释性分析

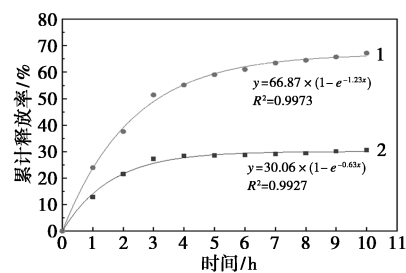
分别取一定量的肉桂醛与肉桂醛微胶囊于玻璃皿中,放置于 80℃ 的鼓风干燥箱里模拟释放过程,每 1 h 取样测定其中肉桂醛含量,结果如图 7(a) 所示。由图可知,肉桂醛释放率远高于肉桂醛微胶囊,在前 3 h 累计释放率达到 50%,经过 10 h 累计释放率达到 65%;肉桂醛微胶囊在前 2 h 释放率较高,2 h 后缓释曲线趋于平缓,10 h 后累计释放率约 30%。由此可见,肉桂醛被包埋进微胶囊后可以有效降低其释放率,达到缓慢释放的目的。

## 2.8 肉桂醛微胶囊释放动力学分析

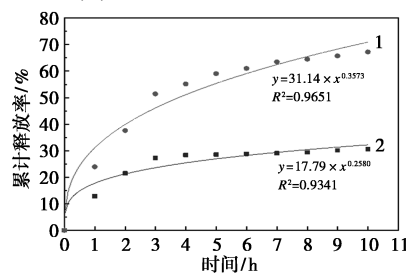
已知一级动力学方程为: $y = a \times (1 - e^{-Kx})$ 、Peppas 动力学方程为: $y = K \times x^n$ 。将肉桂醛和肉桂醛微胶囊在同一温度下不同时间内的释放数据进行拟合,结果如图 7(b)、7(c) 所示,肉桂醛与肉桂醛微胶囊一级动力学方程计算出的相关系数  $R^2$  分别为 0.997 3 和 0.992 7,而 Peppas 动力学方程计算出的相关系数  $R^2$  分别为 0.965 1 与 0.934 1,说明肉桂醛与肉桂醛微胶囊的释放过程都符合一级动力学。



(a) 缓释曲线



(b) 一级方程非线性拟合曲线



(c) Peppas 方程非线性拟合曲线

1—肉桂醛;2—肉桂醛微胶囊

图 7 肉桂醛和肉桂醛微胶囊缓释曲线及释放动力学分析

### 3 结论

以 CS 与 PEG 作为复合壁材、肉桂醛为芯材,以微胶囊的负载率为考察指标,通过单因素和正交试验对肉桂醛微胶囊的制备工艺进行了优化,确定了制备肉桂醛微胶囊的最佳条件为:PEG 添加量 1.50 g、芯材质量分数 5.0%、交联剂用量 0.50 g。经过 3 次重复试验后得到此条件下的肉桂醛微胶囊的负载率为 20.89%。

对最佳工艺条件下制备的肉桂醛微胶囊进行表征,其红外光谱中可以看出 CS 与 PEG 分子间的化学结构和性质并未改变,成功地将肉桂醛包埋进 CS 与 PEG 的复合壁材中。TEM 图显示样品为大小均一的球形微胶囊。热重和缓释试验表明微胶囊能有效地减缓肉桂醛的挥发释放,在一定温度下肉桂醛微胶囊较为稳定,延长了留香时间,达到了缓释效果。本实验方法简单易操作,制备的微胶囊体系较为稳定,为肉桂醛在烟草加香方面以及在现代食品工业生产中的应用提供了参考。

### 参考文献

- [1] 许超群,戴凡炜,陈于隄,等.肉桂醛在水果保鲜中的应用及其包埋技术研究进展[J].现代食品科技,2023,39(12):320-327.
- [2] 刘冰洁.单宁酸交联复凝聚肉桂醛微胶囊的防霉作用及抗菌膜应用[D].无锡:江南大学,2022.
- [3] 刘金铭,范旭,孔保华,等.添加肉桂醛的海藻酸钠/蟹壳粉双交联水凝胶吸水衬垫对冷却肉的保鲜效果[J].食品科学技术学报,2022,40(4):148-158.
- [4] 赵艳丽,彭卓亚,徐永平,等.肉桂醛在猪生产中的应用研究进展[J].中国畜牧兽医,2024,51(10):4373-4382.
- [5] 杨辉,高红芳.反溶剂法制备肉桂醛/乙基纤维素微胶囊及其表征[J].高分子材料科学与工程,2017,33(7):121-125.
- [6] 余春平,许春芳.肉桂醛微胶囊的制备及应用进展[J].农产品加工,2023,(6):95-97.
- [7] 赵佳轩.壳聚糖/透明质酸钠微胶囊的性能及抑菌效果[J].天津化工,2024,38(6):29-33.
- [8] 程书瑾,谢万淙,姜斌,等.温敏型 L-薄荷醇微胶囊制备及性能[J/OL].食品研究与开发,2025,46(3):97-106.
- [9] 汤朝晖,陈学思.聚谷氨酸接枝聚乙二醇抗肿瘤药物靶向输送系统[J].高分子学报,2019,50(6):543-552.
- [10] Chang C W, Yeh Y C. Poly ( glycerol sebacate )-co-poly ( ethylene glycol )/gelatin hybrid hydrogels as biocompatible biomaterials for cell proliferation and spreading [ J ]. Macromolecular Bioscience, 2021, 21 ( 12 ): e2100248.
- [11] 阎瑾,胡雪敏,崔青云,等.甜橙香精微胶囊的制备及缓释性能研究[J].河北工业科技,2024,41(3):220-226.
- [12] Wani S U D, Ali M, Mehdi S, et al. A review on chitosan and alginate-based microcapsules: Mechanism and applications in drug delivery systems [ J ]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 248: 125875.
- [13] 徐珍珍,李伟,张朝辉,等.聚乙二醇分子量和用量对 AHS 与纤维间粘合强度的影响[J].化工新型材料,2017,45(4):199-201.
- [14] 王婷,蔡照胜,徐清.聚乙二醇化壳聚糖的制备及其应用研究进展[J].化学通报,2020,83(6):536-545.
- [15] 张明洋,姜方志,张林.壳聚糖/聚乙二醇和茶多酚对棉织物的抗紫外线整理[J].毛纺科技,2023,51(11):23-28.
- [16] 王帅,杨顺贺,杨紫珊,等.响应面法优化丁香酚缓释微胶囊的制备[J].食品科技,2023,48(10):234-242.
- [17] 王卉,白燕,杨波,等.海藻酸钠/微晶纤维素复合壁材的性能及对精油微胶囊缓释性的影响[J].食品科技,2020,45(2):111-116.
- [18] 李宇伟,连瑞丽,廉世宇,等.复方肉桂醛微囊的制备及质量评价[J].饲料研究,2023,46(6):66-70.
- [19] 陈莉纯,刘敬科,贾艳菊,等.响应面法优化橄榄油/椰子油微胶囊纳米乳液配方[J].粮食与油脂,2024,37(10):48-54.
- [20] 袁松凯,周立,徐园杰,等.簇状糊精复合壁材包埋核桃油的工艺过程研究[J/OL].中国粮油学报,2024,1-16.
- [21] 张跃跃,乐政涛,于瑞涛,等.宽叶独行菜提取物微胶囊的制备与表征[J].安徽大学学报(自然科学版),2024,48(4):80-89.
- [22] 解希娜,王春红,刘星,等.黄芩苷抗菌微胶囊的制备及其对棉织物的整理[J].上海纺织科技,2024,52(1):20-24,29.
- [23] 何鹏,张慧芸,康怀彬,等.丁香精油-壳聚糖纳米胶囊的制备及表征[J].食品与机械,2019,35(6):36-42.
- [24] 马宇航,李萍,徐斌,等.硅酸钠/聚乙二醇浸渍改性杨木工艺及性能研究[J].包装工程,2023,44(23):1-10.
- [25] 石强,秦明娜,唐望,等.聚乙二醇包覆  $\alpha$ -AlH<sub>3</sub> 稳定化研究[J].应用化工,2023,52(12):3332-3334.
- [26] 孙铭泽,麦广庆,管仁贵,等.基于油凝胶的肉桂醛长效释放及抗菌应用研究[J].保鲜与加工,2024,1-16.
- [27] Wen P, Zhu D H, Wu H, et al. Encapsulation of cinnamon essential oil in electrospun nanofibrous film for active food packaging [ J ]. Food Control, 2016, 59: 366-376.
- [28] Yuan C, Jin Z, Xu X, et al. Preparation and stability of the inclusion complex of astaxanthin with hydroxypropyl- $\beta$ -cyclodextrin [ J ]. Food Chemistry, 2008, 109 ( 2 ): 264-268.
- [29] Nayeresadat H, Faramarz K, Mohammad S. Improving the antifungal activity of clove essential oil encapsulated by chitosan nanoparticles [ J ]. Food Chemistry, 2018, 34: 88-93.
- [30] 许春平,黄家乐,刘远上,等.烟草亚微米微胶囊的制备及在加热卷烟中应用研究[J].中国烟草学报,2023,1-15.
- [31] 桂正杰,熊友鹏,黄启东,等.多不饱和脂肪酸油脂微胶囊的工艺优化[J].食品与机械,2022,38(8):202-206,233.
- [32] 赵厚菲,呼芷晴,徐永霞,等.肉桂醛-羟丙基- $\beta$ -环糊精包合物的喷雾干燥法制备及表征[J].包装与食品机械,2020,38(1):25-29. ■