



# 基于喷雾干燥法制备的薰衣草精油 微胶囊及其缓释性能

温礼馨, 赵路通, 秘一芳, 曹志海

(浙江理工大学先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室, 杭州 310018)

**摘要:** 为提高薰衣草精油的稳定性并延长其缓释性能, 以天然高分子材料麦芽糊精为壁材, 薰衣草精油为芯材, 二氧化硅粒子作为分散剂, 通过喷雾干燥工艺制备薰衣草精油微胶囊。分析和表征薰衣草精油微胶囊的形貌、组成和精油含量, 并对薰衣草精油的释放行为进行探究。结果表明: 当进风温度为 180 °C, 风速为 50 m<sup>3</sup>/h, 采用快速通针模式, 蠕动泵流速为 15 mL/min 时, 所制备的微胶囊数均粒径为 (10.80 ± 5.10) μm, 精油含量为 36.87%, 包埋率为 93.38%。通过 Avrami's 公式对微胶囊释放过程进行拟合, 发现在不同温度下, 薰衣草精油微胶囊精油的释放是非恒速、非稳态动力学过程, 4 °C 低温条件保存薰衣草精油微胶囊可有效降低芯材的释放速率。此外, 喷雾干燥后的微胶囊粉末可分散于水中, 在 25 °C 下储存 50 h 后仍然具有良好的稳定性。该研究结果进一步拓宽了薰衣草精油的应用领域, 延长其使用期限。

**关键词:** 麦芽糊精; 薰衣草精油; 喷雾干燥; 微胶囊; 释放行为

**中图分类号:** TQ657

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2021)05-0295-07

## Lavender essential oil microcapsules prepared by spray drying method and its sustained-release properties

WEN Lixin, ZHAO Lutong, MI Yifang, CAO Zhihai

(Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To improve the stability and prolong the sustained-release properties of lavender essential oil, lavender essential oil microcapsules were prepared using spray drying method, with natural high polymer material maltodextrin as wall material, lavender essential oil as the core material, and silicon dioxide particles as the dispersant. The properties such as morphology, composition, and essential oil content of the lavender essential oil microcapsules were characterized and the release behavior of lavender essential oil was analyzed. The results indicated that when the inlet air temperature was 180 °C, the wind speed was 50 m<sup>3</sup>/h, fast nozzle cleaning mode was adopted, the flow rate of peristaltic pump was 15 mL/min, the mean particle size of the microcapsules obtained was (10.80 ± 5.10) μm, the essential oil content was 36.87%, and the embedding rate was 93.38%. The release process of microcapsules was fitted by Avrami's formula and it was found that the release of lavender essential oil microcapsules at different temperatures was a non-constant and unsteady dynamic process, and the release rate of this material could be effectively reduced by preserving lavender essential oil microcapsules at a low temperature (4 °C). Besides, the microcapsule powder after spray drying can be dispersed in water, and still has good stability after storage

收稿日期: 2021-01-04 网络出版日期: 2021-02-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51573168)

作者简介: 温礼馨(1996—), 女, 安徽滁州人, 硕士研究生, 主要从事微胶囊方面的研究。

通信作者: 曹志海, E-mail: zhcao@zstu.edu.cn

at 25 °C for 50 h, which further expands the application field of lavender essential oil and prolongs its service life.

**Key words:** maltodextrin; lavender essential oil; spray drying; microcapsule; release behavior

## 0 引言

薰衣草精油富含薰衣草醇、芳樟醇、罗勒烯和樟脑等多种活性成分,因其具有芳香宜人、杀菌、抗氧化、镇静和驱虫等功效,在日用品工业(如化妆品、洗涤剂)和医药领域有着广泛的应用。然而,薰衣草精油水溶性差、易挥发,对温度、水分敏感,有效活性成分易氧化,严重影响薰衣草精油功效的长效性和稳定性<sup>[1-4]</sup>。因此,提高薰衣草精油的稳定性、实现按需释放,对薰衣草精油的实际应用有着重要的意义。

微胶囊技术是利用成膜材料将固体或液体芯材包埋起来,从而形成具有半通透性或密封囊膜的微型胶囊技术<sup>[5]</sup>。精油微胶囊化可避免外部环境对精油的影响,有利于提高精油的稳定性,并延缓其释放速率。常见的微胶囊制备方法有凝聚法、界面缩聚法、喷雾干燥法、层层自组合法等<sup>[6]</sup>。其中喷雾干燥具有生产效率高、连续操作等优点,适用于大规模工业生产。此外,喷雾干燥在密闭容器中进行,避免了环境对产品的污染,干燥后的产品具有较好的分散性、水溶性。天然高分子麦芽糊精是淀粉部分水解的产物,具有良好的溶解性和低黏度特点,可满足喷雾干燥工艺需求<sup>[7]</sup>。此外,相比于常用的阿拉伯胶,麦芽糊精具有价格低廉、抗氧化等优势<sup>[8]</sup>。

本文选用麦芽糊精为壁材,薰衣草精油为芯材,二氧化硅胶体作为分散剂,采用喷雾干燥法制备薰衣草精油微胶囊。通过调控喷雾干燥工艺参数,优化薰衣草精油微胶囊的性能。通过红外谱图、扫描电镜等手段对所制备所得薰衣草精油微胶囊的化学组成、形貌结构进行表征,并对薰衣草精油微胶囊的精油释放行为、水分散稳定性进行评价。本文的研究结果对采用喷雾干燥技术制备精油微胶囊的工艺参数优化以及深入理解精油微胶囊释放行为有一定的指导意义。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

薰衣草精油(F098301,宁波芬畅凝科香料有限公司);麦芽糖糊精(AR,上海阿拉丁试剂有限公司);二氧化硅胶体分散液(固含量为30%,Sigma-Aldrich试剂有限公司);去离子水(电导率

1.32  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;自制);乙醇(AR,上海阿拉丁试剂有限公司);乙醚(AR,杭州双林化工试剂有限公司);石油醚(AR,上海泰坦科技股份有限公司)。

### 1.2 主要实验仪器

高速剪切机(FA25型,弗鲁克公司);实验室小型喷雾干燥仪(SD-06实验室小型喷雾干燥仪,英国Lanplant公司);恒温水浴槽(BHC型,杭州大卫科教仪器有限公司);恒温恒湿箱(CTHI-150B,施都凯仪器设备有限公司);光学显微镜(DMEX30,上海舜宇恒平科学仪器有限公司);扫描电子显微镜(SEM,Phenom Pro,荷兰飞纳公司);水流抽气机(A-1000S,上海爱朗仪器有限公司);分析天平(ME型,梅特勒-托利多仪器有限公司);超声波清洗器(KQ5200DE型,昆山市超声仪器有限公司)。

### 1.3 麦芽糊精薰衣草精油微胶囊的制备

将30 g麦芽糊精在50 °C条件下搅拌溶解于44 g水中,得到麦芽糊精水溶液;然后加入6 g固含量30%的二氧化硅水分散液,并加入20 g薰衣草精油,在高速剪切条件下(10000 r/min)乳化2 min,得到稳定的薰衣草微胶囊精油预分散体系。安装喷雾干燥仪并优化温度设置、风速设置、蠕动泵速率、通针速率等工作参数。通过观察料液是否雾化成雾状小液滴、左侧接受瓶中是否有物料、右侧接受瓶中是否得到干燥的微胶囊产品等现象,优化最佳喷雾干燥工艺参数。在优化的喷雾干燥工艺参数下,将薰衣草精油微胶囊预分散乳液以一定速度进样、喷样,进样完毕后收集样品并清洗仪器。

### 1.4 测试与表征

#### 1.4.1 薰衣草精油微胶囊的粒径及表面形貌的表征

采用扫描电镜观测薰衣草精油微胶囊形貌并统计粒径尺寸。测试时,用导电胶将薰衣草精油微胶囊粘贴于样品台上,喷金处理,然后在加速电压为10 kV,样品放置高度为15 mm的条件下观察精油微胶囊的形貌。通过统计SEM图中60个薰衣草精油微胶囊的粒径,计算得到微胶囊的数均粒径和标准偏差<sup>[9]</sup>。

#### 1.4.2 薰衣草精油微胶囊表面油、总油及包埋率的测定

薰衣草精油微胶囊包埋率可以通过表面油、总

油的测定计算得出。表面油的测定具体方法为<sup>[10]</sup>: 将干净的滤纸折叠好后放在直径为5 cm的漏斗上, 准确称量2 g薰衣草精油微胶囊粉末置于滤纸上, 取10 mL沸程为60~90 °C的石油醚浸泡样品, 待滤液完全从漏斗中流出, 重复上述操作, 浸泡-萃取微胶囊样品4次后, 将滤液转移至已知质量的圆底烧瓶中, 烧瓶质量记为 $m_1$ , 50 °C下减压蒸馏直至烧瓶与滤液总质量恒重后, 称量烧瓶与萃取的精油总质量记为 $m_2$ ,  $m_2$ 与 $m_1$ 的差值为表面油含量 $m_s$ 。

薰衣草精油微胶囊总油的测定<sup>[11]</sup>: 采用混合溶剂提取称重法测定薰衣草精油微胶囊总油的含量, 具体方法如下: 准确称取2 g薰衣草微胶囊样品, 预先分散于10 mL去离子水中, 超声1 min后, 转移至分液漏斗, 向其中加入15 mL无水乙醇, 充分振荡后再加入25 mL乙醚, 摇匀, 最后加入10 mL石油醚, 水平振荡分液漏斗2 min, 待水相、有机相明显分层后, 分离有机相; 向水相中加入5 mL无水乙醇继续萃取水相中残留的精油, 摇匀后再加入15 mL乙醚, 最后加入5 mL石油醚, 震荡分液; 第三次萃取时, 只需加入15 mL乙醚。萃取结束后, 将三次得到的有机相合并转移至质量为 $m_3$ 的圆底烧瓶中, 50 °C减压蒸馏至恒重后, 称量烧瓶与油相的总质量( $m_4$ ), 则薰衣草精油微胶囊总油质量 $m_T$ 等于 $m_4 - m_3$ 。

按式(1)和式(2)计算得到薰衣草精油微胶囊精油含量和包埋率<sup>[12]</sup>:

$$A/\% = \frac{m_T - m_s}{M} \times 100 \quad (1)$$

$$X/\% = \left(1 - \frac{m_s}{m_T}\right) \times 100 \quad (2)$$

其中: $A$ 和 $X$ 分别为薰衣草精油微胶囊的精油含量和包埋率, %;  $m_T$ 为薰衣草精油总油质量, g;  $M$ 为所取薰衣草精油微胶囊质量, g;  $m_s$ 为薰衣草精油微胶囊表面油质量, g。

#### 1.4.3 薰衣草精油微胶囊的释放行为

称取5 g薰衣草精油微胶囊于培养皿, 置于恒温恒湿箱中, 保持湿度不变(30% RH)研究不同温度下精油的释放行为, 每隔1 d取样称重, 按式(3)计算薰衣草精油保留率<sup>[13]</sup>。

$$W/\% = \frac{m_t}{m_0} \times 100 \quad (3)$$

其中: $W$ 为薰衣草精油保留率, %;  $m_t$ 为 $t$ 时刻微胶囊中薰衣草精油质量, g;  $m_0$ 为初始微胶囊中薰衣草

精油质量, g。

通过Avrami's公式拟合精油微胶囊释放过程, 分析微胶囊精油的释放规律。Avrami's公式如下<sup>[14]</sup>:

$$R = \exp[-(kt)^n] \quad (4)$$

其中: $R$ 为 $t$ 时刻薰衣草精油保留率, %;  $t$ 为贮存时间, d;  $n$ 为释放机理参数;  $k$ 为释放速率常数,  $d^{-1}$ 。一般认为,  $n=0.45$ 时表示精油的释放为扩散限制过程;  $n=1$ 时精油释放为一级动力学过程<sup>[14]</sup>。方程(4)两边同时取两次对数可得:

$$\ln(-\ln R) = n \ln t + n \ln k \quad (5)$$

分别以 $\ln t$ 、 $\ln(-\ln R)$ 为横纵坐标, 进行线性回归, 通过回归方程得到参数 $n$ 和常数 $k$ 。

#### 1.4.4 薰衣草精油微胶囊的水分散稳定性

取1 g的麦芽糊精薰衣草精油微胶囊均匀分散于10 g去离子水中, 采用光学显微镜(放大40倍)观察分散于水中的微胶囊尺寸及形貌; 将微胶囊水分散液在室温下储存, 每隔一段时间取样稀释到一定浓度后测定其Zeta电位, 并绘制Zeta电位与储存时间关系曲线。

## 2 结果与讨论

### 2.1 喷雾干燥工艺条件优化

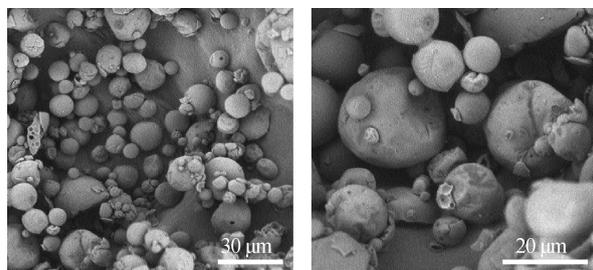
以麦芽糊精为壁材, 薰衣草精油为芯材, 二氧化硅作为分散剂, 通过喷雾干燥法制备薰衣草精油微胶囊。喷雾干燥工艺参数优化结果如表1所示。由表1可知, 喷雾干燥参数对薰衣草精油微胶囊性能有重要的影响。温度过低、通针速率过快、蠕动泵进样速率过快, 均会导致预分散体系雾化不完全, 从而形成液滴。在干燥过程中, 热气流量主要影响产品水分含量, 决定着雾滴能否被有效的干燥, 且与微胶囊的产率、是否黏壁有直接关系。热风流量过大时, 部分微胶囊未能被有效地分离回收, 导致产率下降; 热风风速过小时, 雾化的液滴不能充分干燥, 易发生黏壁现象, 样品不易吹入收集瓶而造成浪费。当喷雾干燥条件为: 进风温度190 °C、通针模式为快速、蠕动泵为15 mL/min、风速为50 m<sup>3</sup>/h时, 进样完全。但是进风温度过高, 喷雾干燥时料液中精油的挥发量越多。基于上述分析, 薰衣草精油微胶囊优化的喷雾干燥条件为: 进风温度为180 °C、风速为50 m<sup>3</sup>/h、通针模式为快速、蠕动泵流量为15 mL/min。在后续实验中, 采用上述优化的喷雾干燥参数制备微胶囊。

表1 喷雾干燥条件对喷雾效果的影响

进风温 度/ $^{\circ}\text{C}$	热风 量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	通针 模式	泵速/ $(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	结果
160	40	慢速	20	喷雾不完全,料液未完全干燥
160	40	慢速	15	通针较慢,料液易发生堵塞
160	40	快速	15	出现未喷物料
160	50	快速	15	喷雾基本完全,有残留料液
170	50	快速	15	喷雾基本完全,有残留料液
180	50	快速	15	进样喷雾完全
190	50	快速	15	进样喷雾完全

## 2.2 薰衣草精油微胶囊的粒径及形貌结构表征

图1为薰衣草精油微胶囊扫描电镜图像。从图1中发现,采用喷雾干燥工艺制备的薰衣草微胶囊具有球形结构,通过统计SEM图片上微胶囊粒径尺寸,微胶囊的平均粒径为 $(10.80 \pm 5.10) \mu\text{m}$ ,同时因干燥过程中水分快速挥发,且壳壁的刚性不足,部分薰衣草精油微胶囊出现一定程度的凹陷。微胶囊小颗粒间发生少量团聚,这是因为亲水二氧化硅均匀分布在雾化形成的微小液滴内,使得分布在微胶囊表面的二氧化硅相对较少,水分挥发后在微胶囊表面的麦芽糊精所占的比例相对变大;同时麦芽糊精具有一定的黏性,半干的微胶囊颗粒与高温空气接触后易粘连在一起,导致微胶囊小颗粒间发生团聚<sup>[15]</sup>。



(a) 放大2000倍

(b) 放大4000倍

图1 薰衣草精油微胶囊的SEM图像

## 2.3 薰衣草精油微胶囊的组成分析

图2是薰衣草精油、麦芽糊精和精油微胶囊的红外谱图。从图2中可以看出,  $3467 \text{ cm}^{-1}$  和  $1047 \text{ cm}^{-1}$  为薰衣草精油羟基( $-\text{OH}$ )特征吸收峰,  $1744 \text{ cm}^{-1}$  为薰衣草精油中酯类成分的  $\text{C}=\text{O}$  特征吸收峰。对于麦芽糊精,  $1645 \text{ cm}^{-1}$  为糖类分子的  $-\text{OH}$  振动吸收峰,  $1155$  和  $1080 \text{ cm}^{-1}$  是由于  $\text{C}-\text{O}$  键的收缩振动峰,  $1018 \text{ cm}^{-1}$  是  $=\text{CH}$  和  $=\text{CH}_2$  的键角变形产生的特征峰<sup>[16]</sup>。从微胶囊的红外谱图中可以观察到  $1744 \text{ cm}^{-1}$  和  $1645 \text{ cm}^{-1}$  处出现明显的吸收峰,分别为薰衣草精油中的  $\text{C}=\text{O}$  和麦芽糊精中的  $-\text{OH}$  特征吸收峰。

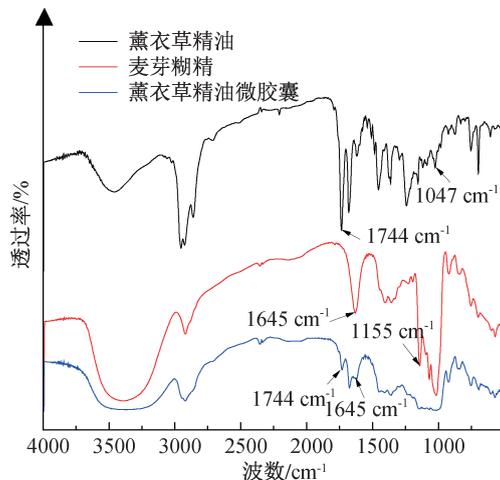


图2 薰衣草精油、麦芽糊精和薰衣草精油微胶囊的红外谱图

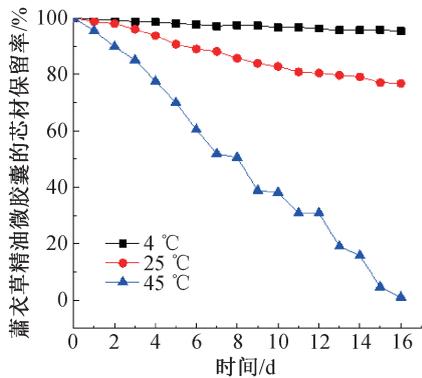
## 2.4 薰衣草精油微胶囊精油含量及包埋率的测定

通过萃取法、混合溶剂提取称重法,经过浸泡、洗涤、过滤、减压蒸馏等一系列操作最终测得  $2 \text{ g}$  薰衣草精油微胶囊表面油含量  $52.3 \text{ mg}$ ,薰衣草精油微胶囊总油质量  $789.6 \text{ mg}$ 。由式(1)和式(2)计算可得薰衣草精油微胶囊中精油含量为  $36.87\%$ ,包埋率为  $93.38\%$ ,且薰衣草精油微胶囊中精油含量与实验配方中精油占壁材、精油、分散剂总质量的  $38.61\%$  相近,精油的利用率可达  $95.49\%$ 。结合红外和SEM表征结果,表明可以通过喷雾干燥的方式实现麦芽糊精对薰衣草精油的高效包覆。

## 2.5 薰衣草精油微胶囊缓释性分析

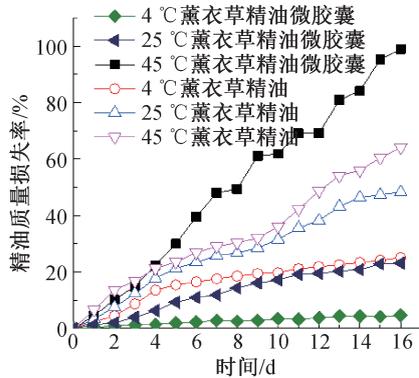
图3(a)为不同温度下薰衣草精油微胶囊芯材保留率随时间的变化。 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时,微胶囊的芯材含量变化不明显,在储存  $16 \text{ d}$  后,芯材保留率仍为  $95.29\%$ 。 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时,  $16 \text{ d}$  后芯材的保留率为  $76.81\%$ 。当温度提高到  $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时,芯材保留率仅为  $1.10\%$ 。随着贮藏时间的延长,薰衣草精油微胶囊的芯材保留率逐渐下降,且贮藏温度越高,芯材释放越快,这可能是由于温度的提高促进薰衣草精油分子布朗运动,从而释放速率加快,同时较高的温度提高了壁材的通透性,降低芯材传质阻力,从而降低芯材保留率。薰衣草精油和薰衣草微胶囊中精油的质量损失率曲线如图3(b)所示,从图中可以看出:在  $4, 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$  下贮藏  $16 \text{ d}$  后,未包覆的薰衣草精油质量损失率分别为  $25.15\%$ 、 $48.31\%$  和  $64.05\%$ ,而薰衣草精油微胶囊中精油质量损失为  $4.72\%$ 、 $23.19\%$  和  $98.89\%$ ,这说明通过喷雾干燥制备的薰衣草精油微胶囊在  $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  下可显著降低薰衣草精油的挥发速度,减少精油损失。在较高温度下 ( $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ),薰衣草精油微胶囊表面积较大,增大了传

质面积,麦芽糊精壳壁孔径增大,同时精油分子布朗运动加快,精油释放速率增加,储存 16 d 后,精油质



(a) 薰衣草精油微胶囊

量几乎完全损失。由此,薰衣草精油微胶囊贮藏过程中需严格控制温度。



(b) 薰衣草精油和薰衣草微胶囊中精油

图3 不同温度下薰衣草精油微胶囊芯材保留率曲线及薰衣草精油和薰衣草精油微胶囊中精油的质量损失率曲线

进一步通过 Avrami's 公式对薰衣草精油微胶囊在不同温度下的释放曲线进行拟合,得到薰衣草精油微胶囊在不同温度下保留率与释放时间之间的关系,相关结果如图 4 和表 2 所示。薰衣草精油释放与时间的相关性较高,回归方程中相关系数  $R^2$  均大于 0.96,说明可采用 Avrami's 公式对薰衣草精油微胶囊精油的释放过程进行拟合。如表 3 所示,不同温度下,精油的释放机理参数  $n$  分别为 0.86、1.15 和 1.53。在 4 °C 下  $n$  小于 1,表明低温时薰衣草精油微胶囊中精油释放行为介于扩散限制和一级动力学之间,而 25 °C 和 45 °C 的释放机理参数  $n$  均大于 1,即在 25~45 °C 条件下薰衣草精油微胶囊的释放高于一级动力学释放,为挥发性快速释放过程<sup>[17]</sup>。随着温度的升高,芯材释放速率  $k$  增大,说明温度对芯材释放有显著影响。麦芽糊精中含有大量糖类长链,温度提高,分子链运动能力提升,包封能力下降,薰衣草精油的渗透性提高<sup>[8]</sup>,尤其当温度为 45 °C 时,薰衣草精油释放速率常数达到  $1.34 \times 10^{-1}/\text{d}$ ,精油的迅速释放导致在后期偏离了线性拟合曲线。综上,薰衣草精油微胶囊在不同温度下的释放为非恒速,非稳态的动力学过程,并且在低温条件(4 °C)保存薰衣草精油微胶囊可有效降低芯材的释放<sup>[18]</sup>。

## 2.6 薰衣草精油微胶囊的水分散性分析

取 1 g 麦芽糊精薰衣草精油微胶囊分散于 10 g 水中,并将其稀释到所需浓度,在光学显微镜下观察其再分散情况。由图 5(a)可以观察到喷雾干燥制备的薰衣草精油微胶囊在水中分散均匀,且在视野内未观察到团聚现象,说明薰衣草精油微胶囊具有良好的水分散性。图 5(b)为在不同储存时间下精油微胶囊的 Zeta 电位。薰衣草精油微胶囊分散于

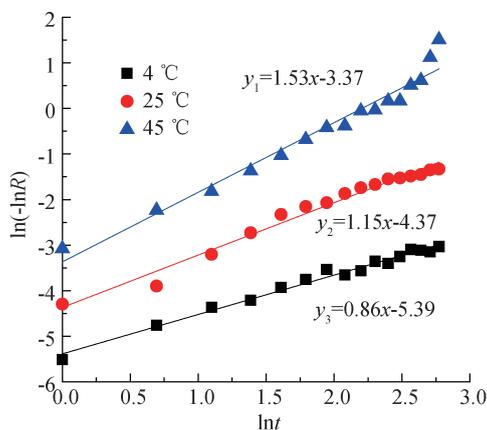


图4 采用 Avrami's 公式对薰衣草精油微胶囊在不同温度下保留率与释放时间关系的拟合曲线

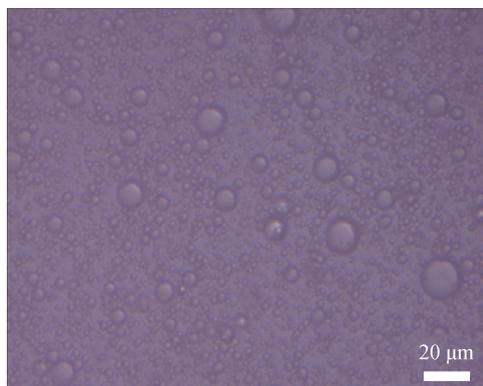
表2 不同温度下的薰衣草精油微胶囊释放机理参数  $n$  及释放速率常数  $k$ 

温度/°C	回归方程	$n$	$k/\text{d}^{-1}$	$R^2$
4	$y_3=0.86x-5.39$	0.86	$1.65 \times 10^{-3}$	0.99
25	$y_2=1.15x-4.37$	1.15	$2.39 \times 10^{-2}$	0.98
45	$y_1=1.53x-3.37$	1.53	$1.34 \times 10^{-1}$	0.96

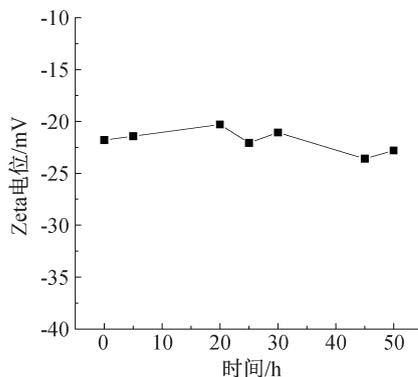
水中,初始电位值为 -21.80 mV,在 50 h 储存期间内,薰衣草精油微胶囊 Zeta 电位变化较小,维持在 -20.30 ~ -23.60 mV 之间。薰衣草精油微胶囊具有稳定的负电性,说明薰衣草精油微胶囊在水中具有良好分散稳定性<sup>[19]</sup>。因此,通过喷雾干燥法制备的薰衣草精油微胶囊具有良好的水分散稳定性,有望应用于纺织品、空气清新剂及洗涤剂等各种生活用品中,拓宽了薰衣草精油应用领域。

## 3 结论

本文通过喷雾干燥法,以麦芽糊精为壁材、二氧化硅为稳定剂,制备了薰衣草精油微胶囊。分析喷雾干燥工艺参数的影响,并通过萃取法和混合溶剂



(a) 薰衣草精油微胶囊的显微镜照片



(b) 微胶囊储存不同时间下的Zeta电位

图5 分散于水中的薰衣草精油微胶囊的显微镜照片以及在 25 °C 条件下薰衣草精油微胶囊储存不同时间的 Zeta 电位变化情况

提取称重法测定了薰衣草精油微胶囊的表面油和总油的含量,计算得出薰衣草精油微胶囊的包埋率,还研究了薰衣草精油微胶囊的释放行为和水分散稳定性,所得主要结论如下:

a) 优化的喷雾干燥工艺条件为:进风温度 180 °C、通针模式为快速、蠕动泵流量为 15 mL/min、风速为 50 m<sup>3</sup>/h;薰衣草精油微胶囊呈球形,粒径为 (10.80±5.10) μm。制备所得薰衣草精油微胶囊中,精油含量为 36.87%,包埋率为 93.38%。

b) 通过 Avrami's 公式拟合,建立微胶囊释放动力学模型,探究了温度对薰衣草精油微胶囊的释放过程的影响,4 °C 低温条件下,芯材释放过程介于扩散限制和一级动力学之间;在 25~45 °C 条件下薰衣草精油微胶囊的释放高于一级动力学释放。高温对薰衣草精油微胶囊芯材保留率的影响较大,低温贮藏能够有效降低芯材释放速率。

c) 制备的微胶囊可均匀分散于水中,50 h 内薰衣草精油微胶囊的表面电位在 -20.30~ -23.60 mV 小范围内波动,薰衣草精油微胶囊具有良好的水分散稳定性,扩宽薰衣草精油的应用领域。

## 参考文献:

- [1] 刘万龙. 复凝聚法制备薰衣草精油微胶囊及其性能表征的研究[D]. 上海:上海应用技术学院, 2014: 13-14.
- [2] 张艳, 李正跃, 陈斌. 薰衣草精油对斜纹夜蛾的生物活性测定[J]. 南方农业学报, 2019, 50(11): 2481-2488.
- [3] 刘贵有, 杨新周. 狭叶薰衣草精油成分研究[J]. 云南化工, 2019, 46(7): 11-13.
- [4] 李扬. 薰衣草精油微胶囊化的研究[J]. 染整技术, 2017, 39(8): 21-23.
- [5] 耿凤, 邵萌, 魏健, 等. 微胶囊技术在保护天然活性成分中的应用研究进展[J]. 食品与药品, 2020, 22(3): 250-255.
- [6] 朱则刚. 微胶囊技术开辟纺织染整应用发展的新途径[J]. 乙醛醋酸化工, 2020, 48(3): 35-41.
- [7] 傅胜, 施湘君. 喷雾干燥技术在制备固体分散体中的应用研究进展[J]. 浙江化工, 2020, 51(7): 22-25.
- [8] Desobry S A, Netto F M, Labuza T P. Influence of maltodextrin systems at an equivalent 25DE on encapsulated β-carotene loss during storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 1999, 23(1): 39-55.
- [9] Gao F, Wu X, Wu D, et al. Preparation of degradable magnetic temperature and redox-responsive polymeric/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite nanogels in inverse miniemulsions for loading and release of 5-fluorouracil[J]. Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 587: 124363-124373.
- [10] 黄英雄, 孙红明, 华聘聘. 微胶囊化粉末油脂制品表面油测定方法的研究[J]. 中国油脂, 2002, 27(4): 61-63.
- [11] 李霞, 范亚苇, 张兵, 等. 肉桂精油微胶囊中精油提取和测定方法的比较[J]. 中国食品学报, 2019, 19(8): 265-270.
- [12] 杨艳红, 李湘洲, 周军, 等. 山苍子油微胶囊的制备技术比较及其释放动力学[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(7): 78-84.
- [13] 卢惠敏, 杨海英, 李春海, 等. 茶树精油 β-环糊精包合物的制备及其贮存稳定性分析[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(6): 31-36.
- [14] 刘斯博, 田少君, 夏克东. 亚麻籽油微胶囊芯材的释放条件及模拟缓释行为研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(9): 31-35.
- [15] 陈鑫. 聚合物乳液的干燥过程及颗粒形态控制研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013: 25-33.
- [16] 曹祥薇, 胡蓓, 侯宁, 等. 明胶/麦芽糊精复合壁材制备

- 香精微胶囊[J].黑龙江大学学报, 2017, 8(2): 47-50.
- [17] Koupantsis T, Paraskevopoulou A. Flavour retention in sodium caseinate-Carboxymethylcellulose complex coagulates as a function of storage conditions[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 459-465.
- [18] 常馨月, 罗惟, 陈程莉, 等. 奇亚籽油微胶囊贮藏稳定性及缓释动力学[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(9): 108-114.
- [19] 王一彤, 赵新玲, 姚佳彤, 等. 香根草精油微胶囊的制备及其体外抗炎作用[J]. 精细化工, 2020, 37(7): 1447-1453.

(责任编辑:刘国金)