



王小莉,朱丽飞,李慧娟,等.壳聚糖-魔芋葡甘聚糖基苯甲醇微胶囊制备及其缓释性能研究[J].轻工学报,2026,41(5):50-58,142.
Wang X L,Zhu L F,Li H J,et al. Preparation and sustained release of chitosan-konjac glucomannan-based benzyl alcohol microcapsules[J]. Journal of Light Industry,2026,41(5):50-58,142.
DOI:10.12187/2026.05.005

壳聚糖-魔芋葡甘聚糖基苯甲醇微胶囊制备及其缓释性能研究

王小莉¹,朱丽飞¹,李慧娟¹,吕凤霞¹,曲书昊¹,汤法银¹,王彬²,李利红¹

1. 河南牧业经济学院 动物医药学院,河南 郑州 450046;
2. 河南牧翔生物股份有限公司,河南 郑州 451161

摘要:【目的】提高苯甲醇的稳定性和缓释性。【方法】以壳聚糖、魔芋葡甘聚糖作为复合壁材制备苯甲醇微胶囊,采用响应面法优化其制备工艺,并采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪、扫描电子显微电镜(SEM)、场发射透射电镜(FETEM)等对其进行表征,通过一级动力学、Higuchi 动力学和 Peppas 动力学模型研究其缓释性能。【结果】苯甲醇微胶囊的最佳制备工艺条件为魔芋葡甘聚糖用量 0.10 g、吐温 80 用量 0.25 mL、三聚磷酸钠用量 0.50 g,在此条件下,该微胶囊的负载率为 16.95%。FTIR 显示该微胶囊图谱在 1040 cm^{-1} 、 2880 cm^{-1} 和 874 cm^{-1} 分别出现苯甲醇、壳聚糖和魔芋葡甘聚糖的特征吸收峰,证明这 3 种组分均存在于该微胶囊体系中。SEM 和 ETEM 显示该微胶囊呈颗粒凸起、球形。在常温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)和高温($80\text{ }^{\circ}\text{C}$)环境下,该微胶囊均可显著减缓苯甲醇的挥发损失,且其缓释过程符合一级动力学方程和 Peppas 动力学方程。【结论】苯甲醇微胶囊的热稳定性、缓释性能均较苯甲醇有显著提高。

关键词:苯甲醇;微胶囊;魔芋葡甘聚糖;壳聚糖;响应面优化;缓释性能

中图分类号:TS202 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2026)05-0050-09

0 引言

苯甲醇以其特有的甜味和清香著称,在自然界中主要存在于茉莉花、风信子、烟草等挥发性油中^[1-2],具备抗菌、抗氧化等特性,常作为香料原料、药物辅料等广泛应用于食品、医药及化妆品行业^[3-4]。当作为香料原料时,苯甲醇可用于增强食品的香气和滋味,赋予其独特的口感^[5-6]。但苯甲醇具有挥发性且易被氧化成苯甲醛和苯甲酸,这直

接限制了其使用。微胶囊技术是解决上述问题的手段之一。微胶囊通过壁材有效隔离空气、光照等以延缓芯材的变质和释放,进而达到持续作用的效果^[7-8]。例如,汪然等^[9]以环糊精为壁材、苯甲醇等多种香料为芯材制备微胶囊,发现 7 d 时苯甲醇的保留率达 75%,有效减缓了苯甲醇的挥发。

魔芋葡甘聚糖是一种天然的、可生物降解的高分子储备性多糖,溶于水后能迅速形成黏稠溶胶,脱水后可在特定条件下形成具有一定黏性与强度

收稿日期:2026-01-15;修回日期:2026-03-25;出版日期:2026-10-15

基金项目:河南省科技攻关项目(242102110050,252102110029,262102110052)

作者简介:王小莉(1983—),女,河南省汤阴县人,河南牧业经济学院讲师,博士,主要研究方向为植物化学与药物化学。E-mail:xiaoliwang325@126.com

通信作者:李利红(1972—),女,河南省焦作市人,河南牧业经济学院教授,博士,主要研究方向为药物化学。E-mail:snowwhite9527@sina.com

的膜,可用于制备微胶囊和生物膜^[10]。壳聚糖具有良好的抑菌功效,能够抑制革兰氏阴性菌、革兰氏阳性菌等微生物的生长与繁殖,可弥补魔芋葡甘聚糖自身抗菌能力欠佳的缺陷^[11]。由于很多香料原料、药物辅料等在水中的溶解性欠佳及壁材之间交联性不稳定,因此常用吐温 80 作为乳化剂以降低界面张力、促进乳化,用三聚磷酸钠作为交联剂以提高壁材之间的交联性,且二者用量对微胶囊负载率或包埋率均有较大影响^[12-13]。

鉴于此,本研究拟以壳聚糖、魔芋葡甘聚糖为复合壁材、苯甲醇为芯材、吐温 80 为乳化剂、三聚磷酸钠为交联剂制备苯甲醇微胶囊,采用响应面法优化其制备工艺,利用傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 仪、扫描电子显微镜 (SEM)、场发射透射电镜 (FETEM)、热重分析仪等对其进行表征,并考查其不同温度下的释放动力学,以期苯甲醇微胶囊的制备及其在食品、药品等领域的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

壳聚糖,食品级,上海麦克林生化科技有限公司;魔芋葡甘聚糖,食品级,湖北强森魔芋科技有限公司;吐温 80,分析纯,天津市富宇精细化工有限公司;苯甲醇,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;三聚磷酸钠,分析纯,天津瑞金特化学品有限公司。

1.2 主要仪器与设备

UV1800PC 型紫外-可见分光光度计,上海菁华科技仪器有限公司;SCIENTZ-10N/A 型冷冻干燥机,宁波新芝生物科技股份有限公司;Nicolet iS50 型 FTIR 仪,美国赛默飞世尔公司;TGA 2 型热重分析仪,瑞士梅特勒托利多公司;Tecnaï G2 F20 200 kV 型 FETEM,美国赛默飞世尔公司;ZEISS Sigma300 型 SEM,德国蔡司公司;KQ-500DE 型超声仪,昆山市超声仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 标准曲线绘制 分别取 0.01 g 壳聚糖、魔芋葡甘聚糖、吐温 80、三聚磷酸钠于 50 mL 容量瓶中,用蒸馏水溶解定容。取 0.01 g 苯甲醇于 50 mL 容量瓶中,用乙醇溶解定容。上述溶液分别用紫

外-可见分光光度计在 200~500 nm 范围内进行扫描,精度为 2 nm,以质量浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,绘制标准曲线。

1.3.2 苯甲醇微胶囊制备 参考郑健姿等^[14-15]的方法,并进行适当调整。将 0.5 g 壳聚糖添加至 50 mL 1% (如无特殊说明,下文百分号均指质量分数)的醋酸溶液中,持续搅拌至壳聚糖完全溶解,获得 1%的壳聚糖溶液;随后加入魔芋葡甘聚糖,继续搅拌 3 h 以使魔芋葡甘聚糖充分溶解。用 1%的 NaOH 溶液将混合溶液 pH 值调至 5.0,依次添加吐温 80、1.0 mL 苯甲醇,搅拌 1 h;200 W 超声处理 10 min,同时加入 0.15 g 三聚磷酸钠,于 5000 r/min 条件下离心 10 min,弃去上清液,用含吐温 80 的蒸馏水洗涤沉淀 3 次,冻干后,制得苯甲醇微胶囊。

1.3.3 单因素试验 参考王帅等^[15]的方法,并进行适当调整。在固定壳聚糖 (1%) 和苯甲醇 (1 mL) 用量条件下,以负载率为指标,考查魔芋葡甘聚糖用量 (0.05 g、0.10 g、0.15 g、0.20 g 和 0.25 g)、吐温 80 用量 (0.10 mL、0.20 mL、0.30 mL、0.40 mL 和 0.50 mL) 和三聚磷酸钠用量 (0.30 g、0.40 g、0.50 g、0.60 g 和 0.70 g) 对微胶囊负载率的影响。

1.3.4 响应面试验 在单因素试验的基础上,以魔芋葡甘聚糖用量 (A)、吐温 80 用量 (B)、三聚磷酸钠用量 (C) 为自变量,负载率 (Y) 为响应值,设计三因素三水平的响应面试验,具体因素与水平见表 1。

1.3.5 微胶囊负载率测定 参考王帅等^[15]的方法,将 25 mg 苯甲醇微胶囊分散于无水乙醇之中,超声 10 min 后静置 12 h,定容至 25 mL。依据标准曲线计算芯材质量,按照下式计算负载率 (%) :

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

1.3.6 微胶囊红外光谱检测 参考王帅等^[15]的方

表 1 响应面试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of the response surface experiment

水平	因素		
	A/g	B/mL	C/g
-1	0.05	0.20	0.40
0	0.10	0.30	0.50
1	0.15	0.40	0.60

法,取适量样品与 KBr 混合后压片,用 FTIR 仪进行测试,分辨率为 4 cm^{-1} ,扫描次数为 64 次。

1.3.7 微胶囊微观结构表征 参考于晓慧等^[11]的方法,取适量样品,在 10 mA 电流下喷金处理 120 s 后,用 SEM 观察表面形貌;称取少量样品,用乙醇分散后,用 FETEM 观察微观形貌。

1.3.8 微胶囊热稳定性测定 参考孙月^[16]的方法,取适量样品于坩埚内,在 $30\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升温,保护气为 N_2 ,在 $10\text{ mL}/\text{min}$ 的 N_2 环境下测定样品热重。

1.3.9 缓释性能测定 分别取适量苯甲醇、苯甲醇微胶囊放入玻璃培养皿中,再分别置于常温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)和高温($80\text{ }^{\circ}\text{C}$)环境下,每隔一段时间测定一次苯甲醇质量及苯甲醇微胶囊中芯材质量,按照下式计算其挥发率(%):

苯甲醇挥发率 =

$$\frac{\text{初始苯甲醇质量} - \text{一段时间后苯甲醇质量}}{\text{初始苯甲醇质量}} \times 100\%$$

苯甲醇微胶囊挥发率 =

$$\frac{\text{初始微胶囊中芯材质量} - \text{微胶囊芯材剩余质量}}{\text{初始微胶囊中芯材质量}} \times 100\%$$

1.4 数据处理

上述实验均重复 3 次,结果取平均值。采用 Excel 2019 进行数据整理,利用 Design-Expert 13 进行响应面优化,通过 Origin 2019 绘图。

2 结果与分析

2.1 标准曲线绘制结果分析

各原料在 $200\sim 500\text{ nm}$ 范围内的扫描曲线如图 1 所示,其中 1 为苯甲醇,2 为魔芋葡甘聚糖,3 为壳聚糖,4 为吐温 80,5 为三聚磷酸钠。由图 1 可知,苯甲醇于 259 nm 波长处存在明显吸收峰,而壳聚糖、魔芋葡甘聚糖、吐温 80 和三聚磷酸钠在 259 nm 波长处的吸光度极小,且四者均难溶于乙醇,故在采用紫外-分光光度法测定苯甲醇质量浓度时不会产生干扰。因此,将苯甲醇检测波长定为 259 nm 。以苯甲醇质量浓度和吸光度绘制的标准曲线方程为: $y=0.6096x-0.0124$, $R^2=0.9993$ 。

2.2 单因素试验结果分析

各单因素对苯甲醇负载率的影响如图 2 所示。

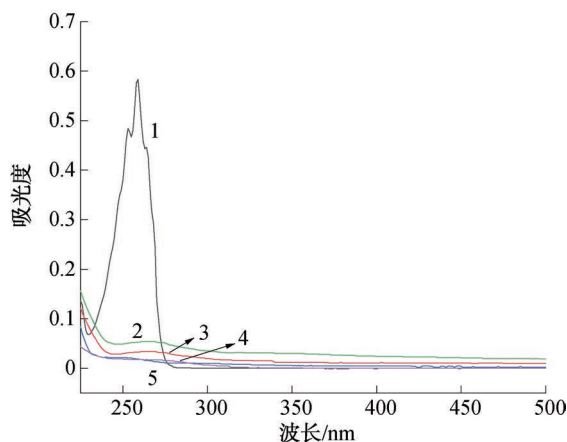


图 1 各原料在 $200\sim 500\text{ nm}$ 范围内的扫描曲线
Fig. 1 Scanning curves of raw materials in the range of $200\sim 500\text{ nm}$

由图 2a)可知,当魔芋葡甘聚糖用量为 0.10 g 时,苯甲醇微胶囊的负载率达最高值 13.25% ;进一步增加魔芋葡甘聚糖用量,该微胶囊负载率开始降低,这可能是因为魔芋葡甘聚糖自身黏度较高,继续增加用量会使水相溶液的黏度增大,造成乳化液稳定性下降,芯材无法充分有效地溶解于壁材溶液中,进而导致负载率降低^[11]。因此,选择魔芋葡甘聚糖用量为 0.05 g 、 0.10 g 、 0.15 g 进行后续响应面试验。

乳化剂吐温 80 能附着于苯甲醇液滴表面,降低油水两相的界面张力,进而显著提高乳化液的稳定性。由图 2b)可知,当吐温 80 用量为 0.30 mL ,苯甲醇微胶囊的负载率达最高值 17.17% ;进一步增加吐温 80 用量,该微胶囊负载率开始降低,这可能是因为多余吐温 80 在体系中会形成胶团,导致体系浓度增大,稳定性降低^[14-15]。因此,选择吐温 80 用量为 0.2 mL 、 0.3 mL 、 0.4 mL 进行后续响应面试验。

交联剂三聚磷酸钠可使复合壁材壳聚糖、魔芋葡甘聚糖进行交联反应,提高微胶囊壳的稳定性。由图 2c)可知,当三聚磷酸钠用量为 0.50 g 时,苯甲醇微胶囊的负载率达最高值 13.5% ;当三聚磷酸钠用量较少时,交联反应不充分;当三聚磷酸钠用量过多时,则会快速推进成型过程,体系黏度进一步升高,致使该微胶囊负载率降低,且会对冷冻干燥处理产生不利影响^[17]。因此,选择三聚磷酸钠用量为 0.40 g 、 0.50 g 、 0.60 g 进行后续响应面试验。

2.3 响应面试验优化结果分析

2.3.1 回归模型 响应面试验设计结果见表 2。

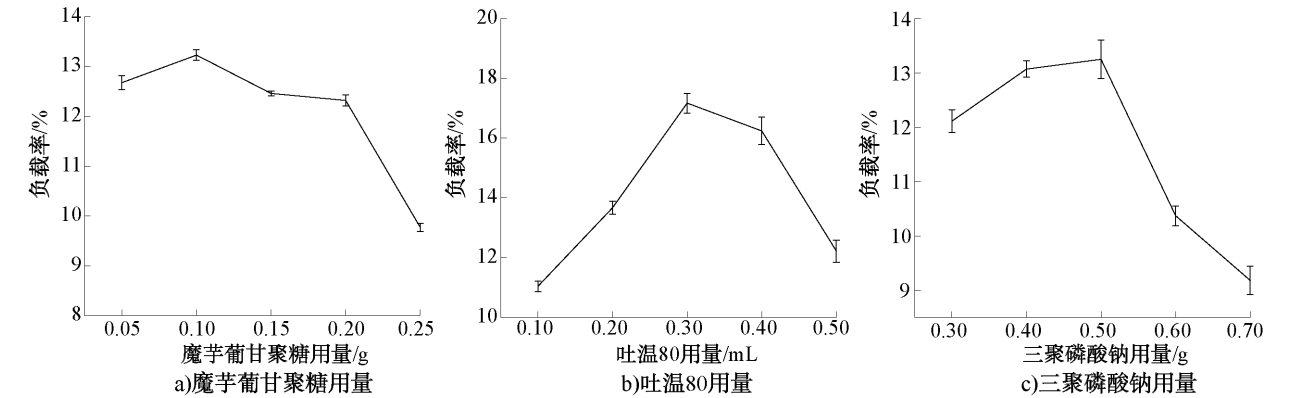


图 2 各单因素对苯甲醇负载率的影响

Fig. 2 Effects of individual factors on the loading efficiency of benzyl alcohol

表 2 响应面试验设计结果				
Table 2 Experimental design and results of response surface methodology				
试验号	A	B	C	Y/%
1	-1	-1	0	14.90
2	1	-1	0	12.66
3	-1	1	0	12.82
4	1	1	0	8.60
5	-1	0	-1	15.26
6	1	0	-1	11.97
7	-1	0	1	13.34
8	1	0	1	9.46
9	0	-1	-1	17.10
10	0	1	-1	12.16
11	0	-1	1	11.81
12	0	1	1	9.79
13	0	0	0	16.16
14	0	0	0	16.26
15	0	0	0	16.90
16	0	0	0	16.28
17	0	0	0	17.14

表 3 回归方程方差分析						
Table 3 Analysis of variance for the regression equation of loading efficiency						
方差来源	总平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	124.73	9	13.86	43.49	<0.000 1	**
A	23.22	1	23.22	72.87	<0.000 1	**
B	21.45	1	21.45	67.31	<0.000 1	**
C	18.27	1	18.27	57.33	0.000 1	**
AB	0.98	1	0.98	3.08	0.122 9	
AC	0.09	1	0.09	0.27	0.617 4	
BC	2.13	1	2.13	6.69	0.036 1	*
A ²	21.42	1	21.42	67.20	<0.000 1	**
B ²	17.66	1	17.66	55.40	0.000 1	**
C ²	13.42	1	13.42	42.11	0.000 3	**
残差	2.23	7	0.32			
失拟项	1.45	3	0.48	2.48	0.200 3	
纯误差	0.78	4	0.19			
R ² = 0.982 4						

注: * 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

采用 Design-Expert 13 软件对表中数据进行分析,得到回归方程为: $Y = 16.55 - 1.70A - 1.64B - 1.51C - 0.49AB - 0.15AC + 0.73BC - 2.26A^2 - 2.05B^2 - 1.79C^2$ 。

回归方程方差分析见表 3。由表 3 可知,一次项 A、B、C 及二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对苯甲醇微胶囊负载率(Y)具有极显著影响;交互项 BC 对负载率具有显著影响。此外,模型的 P 值 $<0.000\ 1$,表明该回归模型具备显著性;失拟项 P 值 $=0.200\ 3 > 0.05$,不具有显著性,表明试验误差较小,模型拟合度较好。

2.3.2 各因素交互作用分析 响应面图坡度的陡缓情况可直观呈现各因素对响应值的影响,而等高线的形状则反映了交互效应的强弱^[18]。各因素交互作用的响应面图及等高线图如图 3 所示。由图 3 可知,3 个因素两两交互的响应面图均呈上凸形,表明存在苯甲醇微胶囊负载率的最大值。从坡度来看,交互项 BC 更为陡峭,表明其对该微胶囊负载率影响更大。从等高线图来看,交互项 AB、AC 的等高线图更接近圆形,表明 A 与 B 之间、A 与 C 之间相互影响较小;交互项 BC 的等高图呈椭圆形,表明 B 与 C 存在交互效应,这与表 3 方差分析结果一致。

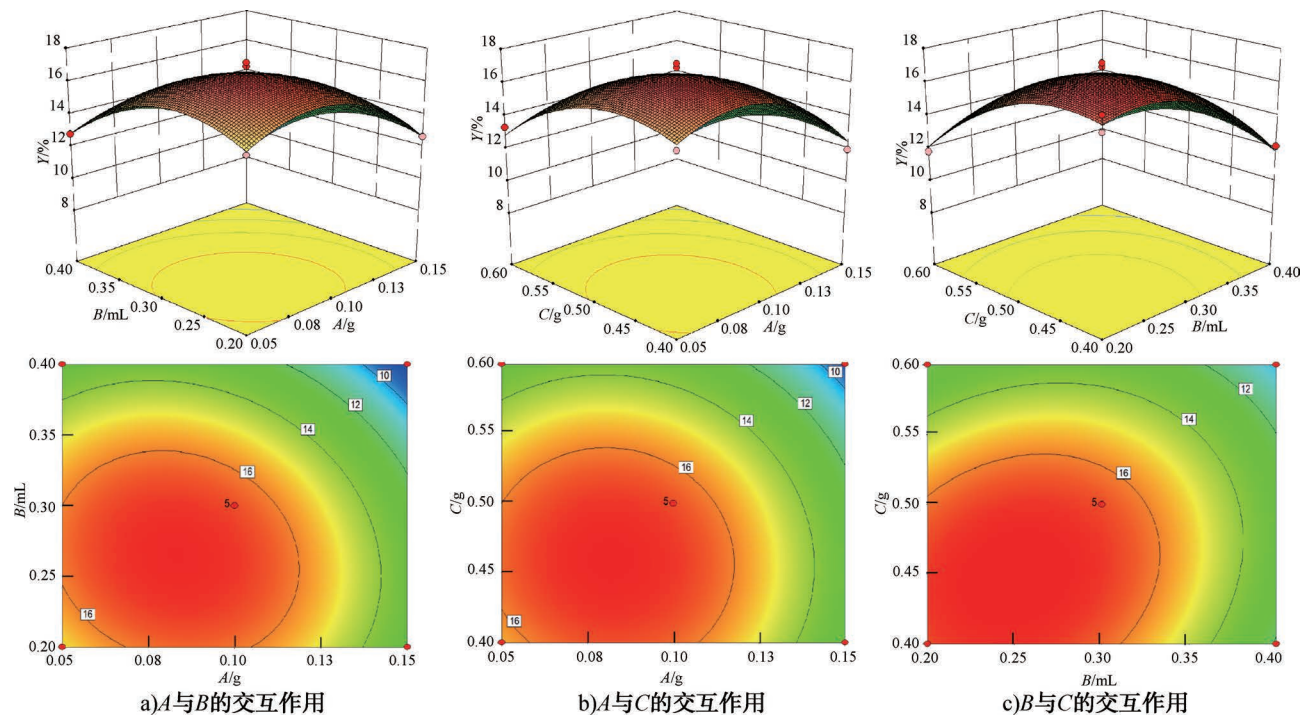


图 3 各因素交互作用的响应面图及等高线图

Fig. 3 Response surface plots and contour plots for the interactions among factors

2.3.3 最佳工艺及验证 通过响应面分析得到最佳工艺条件为魔芋葡甘聚糖用量 0.074 g、吐温 80 用量 0.251 mL、三聚磷酸钠用量 0.460 g,此时苯甲醇微胶囊负载率的预测值为 17.43%。结合实际情况进行修正优化后,最佳工艺条件为魔芋葡甘聚糖用量 0.10 g、吐温 80 用量 0.25 mL、三聚磷酸钠用量 0.50 g,在此条件下进行 3 次验证实验,得到该微胶囊的平均负载率为 16.95%,与预测值接近,表明模型可靠。

2.4 苯甲醇微胶囊 FTIR 分析

苯甲醇微胶囊的 FTIR 图如图 4 所示,其中 1 为壳聚糖,2 为魔芋葡甘聚糖,3 为苯甲醇,4 为苯甲醇微胶囊。由图 4 可知,壳聚糖在 3430 cm^{-1} 附近的吸收峰为 O—H 伸缩振动峰,在 2880 cm^{-1} 附近的吸收峰为—CH₂—的伸缩振动峰,在 1153 cm^{-1} 附近的吸收峰为 C—N 伸缩振动峰,在 1656 cm^{-1} 附近的吸收峰为 CH₃CO—特征峰,在 1040 cm^{-1} 附近的吸收峰为 C—O 振动吸收峰^[19-20]。魔芋葡甘聚糖在 1656 cm^{-1} 附近的吸收峰为 CH₃CO—特征峰^[15],在 874 cm^{-1} 和 802 cm^{-1} 附近的吸收峰由甘露糖单元的伸缩振动诱导产生^[21-22]。苯甲醇在 1040 cm^{-1} 和 1120 cm^{-1} 附近的峰为苯环链接的 C—O 伸缩振动

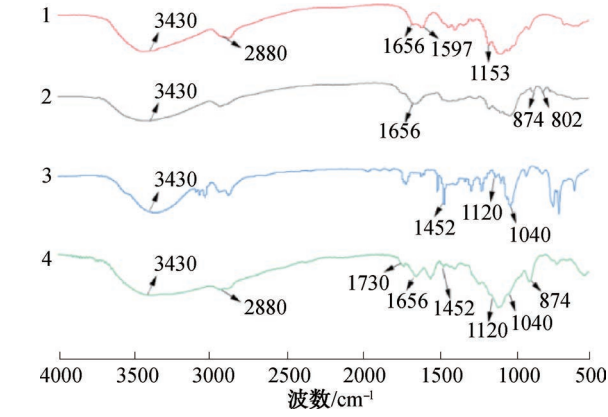
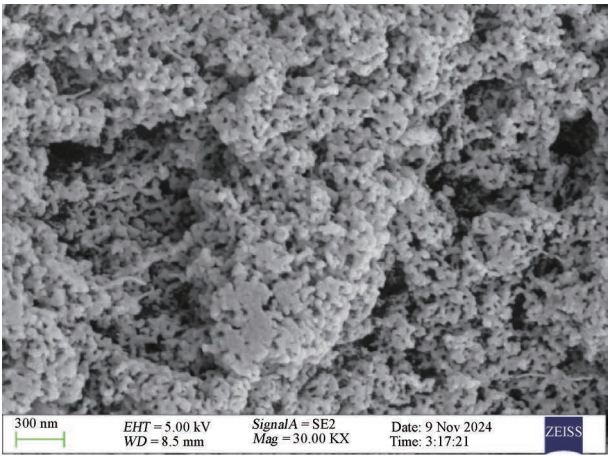


图 4 苯甲醇微胶囊的 FTIR 图

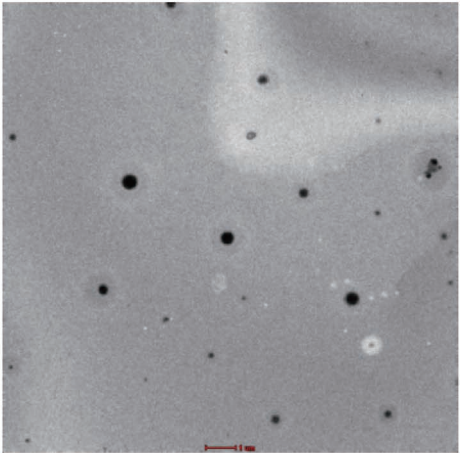
Fig. 4 FTIR spectrum of benzyl alcohol microcapsules 的特征吸收峰,在 1452 cm^{-1} 附近的峰为 O—H 的弯曲振动峰^[23]。在苯甲醇微胶囊的 FTIR 图中,既存在壳聚糖于 2880 cm^{-1} 处的特征吸收峰,又有魔芋葡甘聚糖在 874 cm^{-1} 处的特征吸收峰及苯甲醇在 1040 cm^{-1} 处的特征吸收峰,表明苯甲醇已被成功包埋到壳聚糖与魔芋葡甘聚糖形成的微胶囊中。

2.5 苯甲醇微胶囊形态分析

苯甲醇微胶囊的 SEM 和 FETEM 图如图 5 所示。由图 5a)可知,苯甲醇微胶囊呈明显球形凸起,排列紧密且彼此之间存在粘连现象,这可能是因为壳聚糖和魔芋葡甘聚糖均具有较高的黏度,彼此之



a)SEM 图



b)FETEM 图

图 5 苯甲醇微胶囊的 SEM 和 FETEM 图
Fig. 5 SEM and FETEM images of benzyl alcohol microcapsules

间发生了粘连^[23]。另外,苯甲醇微胶囊表面呈凹凸不平且伴有明显的塌陷,这可能是由该微胶囊在冻干时表面水分挥发所致^[24]。图 5b)可更直观地呈现苯甲醇微胶囊的球形形态,内部颜色深而表面颜色浅,表明该微胶囊内部包埋了苯甲醇芯材。

2.6 苯甲醇微胶囊热稳定性分析

苯甲醇微胶囊的热重曲线如图 6 所示。由图 6 可知,苯甲醇仅存在 1 个失重阶段,即处于 150 ~ 350 ℃ 区间,随着温度升高苯甲醇快速挥发,此阶段失重达 95%。而苯甲醇微胶囊的失重主要分为 3 个阶段:50 ~ 100 ℃ 阶段,该微胶囊质量损失约 14%,这可能是由表面水分散失所致^[25-26];250 ~ 270 ℃ 阶段,该微胶囊质量损失约 15%,这可能是随着温度升高,该微胶囊壁材分子交联断裂,内部芯材苯甲醇迅速挥发;270 ~ 500 ℃ 阶段,随着温度升高,

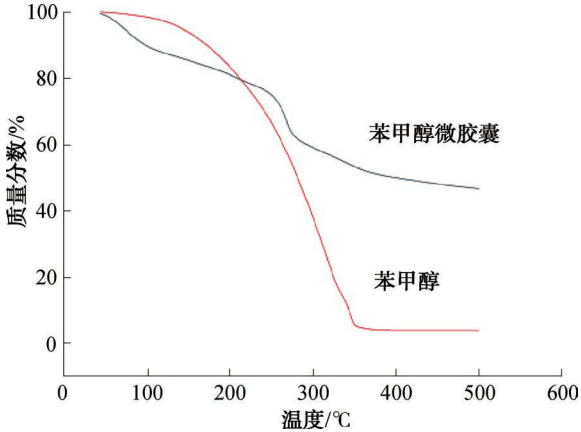


图 6 苯甲醇微胶囊的热重曲线
Fig. 6 Thermogravimetric curve of benzyl alcohol microcapsules

该微胶囊壁材持续分解并最终碳化^[26]。

2.7 苯甲醇微胶囊缓释性能分析

不同温度下苯甲醇微胶囊的释放曲线如图 7 所示。由图 7 可知,在常温(20 ℃)和高温(80 ℃)环境下,随着时间推移,未包裹的苯甲醇及苯甲醇微胶囊中的苯甲醇的挥发率均呈递增趋势,且高温环境会显著加速苯甲醇的挥发。例如,在 80 ℃ 环境中,未包裹的苯甲醇和苯甲醇微胶囊中的苯甲醇在 10 h 时的挥发率分别为 76.39%、51.60%;而在 20 ℃ 环境下,二者在 70 d 时的挥发率分别为 60.66%、21.78%。无论处于低温还是高温环境,该微胶囊均能降低苯甲醇的挥发率,从而实现苯甲醇的缓慢释放。

在考查香料、药物释放动力学模型时,通常会运用 2 种经验模型即一级动力学模型和 Peppas 动力学模型,以及理论推导模型 Higuchi 动力学模型^[27-30]。本研究采用上述 3 种模型方程对苯甲醇微胶囊中苯甲醇随时间的挥发率进行拟合,结果见表 4。由表 4 可知,在常温和高温环境下,未包裹的苯甲醇及苯甲醇微胶囊中的苯甲醇的挥发情况均更符合一级动力学方程与 Peppas 动力学方程,其相关系数 R^2 均大于 Higuchi 动力学方程,结合图 7 可知,Higuchi 动力学曲线与实测数据偏离较大。于波^[28]以多孔硅制备多种吸附材料吸附药物后,在磷酸盐缓冲溶液中的释放遵循一级动力学方程或 Higuchi 动力学方程;杨胜兰^[31]以羧甲基多孔板栗淀粉和海藻酸钠制备多种微胶囊,并考查药物在不

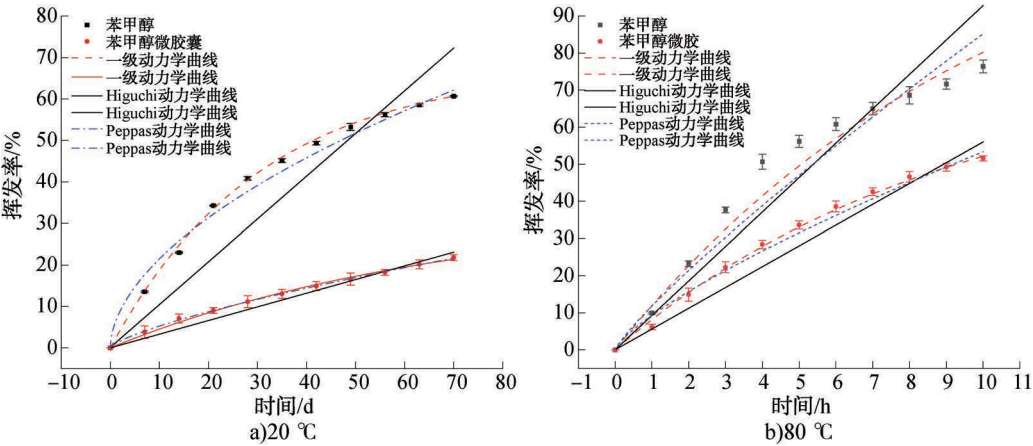


图 7 不同温度下苯甲醇微胶囊的释放曲线

Fig. 7 Release curves of benzyl alcohol microcapsules at different temperatures

表 4 苯甲醇微胶囊的挥发动力学方程

Table 4 Volatilization kinetic equation of benzyl alcohol microcapsules

温度/ ℃	样品	一级动力学方程		Higuchi 动力学方程		Peppas 动力学方程	
		方程式	R ²	方程式	R ²	方程式	R ²
20	苯甲醇	$Y=129.8349(1-e^{-0.0961t})$	0.9891	$Y=18.5570t^{1/2}+0.0131$	0.9689	$Y=6.1024t^{0.54629}$	0.9962
	苯甲醇微胶囊	$Y=78.1039(1-e^{-0.1102t})$	0.9991	$Y=11.2000t^{1/2}+0.0111$	0.9891	$Y=0.9873t^{0.72681}$	0.9995
80	苯甲醇	$Y=67.5330(1-e^{-0.0326t})$	0.9994	$Y=2.0605t^{1/2}+0.1477$	0.9272	$Y=11.8110t^{0.85816}$	0.9813
	苯甲醇微胶囊	$Y=33.4924(1-e^{-0.0145t})$	0.9989	$Y=0.6590t^{1/2}+0.0107$	0.9913	$Y=9.2919t^{0.75901}$	0.9968

同溶液环境下的释放动力学,而上述 3 种动力学方程各有匹配。本研究结果与他们的研究结果较类似。结合图 7 中拟合曲线偏离程度及表 4 中相关系数 R^2 可知,常温下苯甲醇微胶囊中苯甲醇的挥发规律比高温下更符合一级动力学方程与 Peppas 动力学方程,这可能是因为高温下该微胶囊更易破裂,更能加快苯甲醇散失。

3 结论

本研究以苯甲醇作为芯材,壳聚糖、魔芋葡甘聚糖作为复合壁材制备了苯甲醇微胶囊,通过响应面法得到的最佳工艺条件为魔芋葡甘聚糖用量 0.10 g,吐温 80 用量 0.25 mL,三聚磷酸钠用量 0.50 g,在该条件下,该微胶囊的负载率达 16.95%;FTIR 图显示其具有苯甲醇、壳聚糖和魔芋葡甘聚糖的特征吸收峰,表明苯甲醇被成功包埋到微胶囊体系中;SEM 图显示其呈球状且彼此之间有粘连,FETEM 图显示其呈球形,内部颜色较重表面颜色较轻。热重分析结果显示,该微胶囊能够明显延缓苯甲醇的释放,提高苯甲醇的稳定性。3 种缓释模型拟合结果显示,该微胶囊中苯甲醇的释放更符合一级动力学

方程和 Peppas 动力学方程。本研究结果可为苯甲醇缓释相关研究提供参考,后续将对其在食品中的抑菌性、缓释效果等进行深入研究,为其在食品、香料、药物等领域的应用提供技术支撑与参考。

参考文献:

[1] 苏赞,曹源,孙建生,等. 菌酶协同发酵前后低次烟叶香气差异性分析[J]. 轻工学报,2025,40(6):77-86.
Su Z, Cao Y, Sun J S, et al. Analysis of aroma differences in upper low-grade tobacco leaves pre-and post-bacterial-enzyme synergistic fermentation [J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(6): 77-86.

[2] 齐汉如,欧阳少丰,李玉,等. 果胶酶粗酶液与漆酶粗酶液复配酶解膨胀梗丝的工艺优化[J]. 轻工学报, 2025, 40(4): 96-107.
Qi H R, Ouyang S F, Li Y, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis process for expanded tobacco cut stem using combined crude enzymes of pectinase and laccase [J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(4): 96-107.

[3] 乔亚森,林思静,董亚蕾,等. 化妆品中苯甲醇测定的能力验证研究[J]. 中国食品药品监管,2022(5):54-59.
Qiao Y S, Lin S J, Dong Y L, et al. Proficiency testing for

- determination of benzyl alcohol in cosmetics [J]. China Food & Drug Administration Magazine, 2022(5):54-59.
- [4] 曾庆花,黄慧,杨娜,等. 高效液相色谱法测定复方甘草口服溶液中8种防腐剂[J]. 化学分析计量, 2022, 31(7):18-22.
- Zeng Q H, Huang H, Yang N, et al. Determination of 8 preservatives in Compound *Glycyrrhiza* Oral Solution by high performance liquid chromatography [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2022, 31(7):18-22.
- [5] 邢娜,安佰平,杨黎. 苯甲醇对氨茶碱注射液稳定性影响研究[J]. 化学工程与装备, 2023(7):31-32, 73.
- Xing N, An B P, Yang L. Study on the effect of benzyl alcohol on the stability of aminophylline Injection [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2023 (7): 31 - 32, 73.
- [6] 郭成金. 加热卷烟专用烟草浸膏关键香气成分分析及分子蒸馏精制研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2022.
- Guo C J. Analysis of key aroma components and molecular distillation refinement of tobacco extract for heating cigarettes [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.
- [7] 许春平,梁佳欣,张弛,等. 辊压法薄片料液微胶囊的制备及其在电子烟烟油中的应用[J]. 轻工学报, 2023, 38(4):98-104.
- Xu C P, Liang J X, Zhang C, et al. Preparation of casing solution microcapsules of rolled tobacco sheet and its application in electronic cigarette oil [J]. Journal of Light Industry, 2023, 38(4):98-104.
- [8] 柯勤飞,寇兴然. 芳香-健康双导向:功能性芳香新材料研究进展[J]. 应用技术学报, 2024, 24(1):9-21.
- Ke Q F, Kou X R. Aroma-health dual orientation: Research progress on functional aroma new materials [J]. Journal of Technology, 2024, 24(1):9-21.
- [9] 汪然,李鲁,李春来,等. 甜润感化合物微胶囊的制备及缓释性能研究[J]. 材料导报, 2025, 39(S1):705-710.
- Wang R, Li L, Li C L, et al. Study on preparation and slow-release properties of microcapsule containing compounds with sweet and moisturizing flavor [J]. Materials Reports, 2025, 39(S1):705-710.
- [10] 毕英豪,贾爱荣,张绵松,等. 魔芋葡甘聚糖-乳清蛋白复配对维生素 $CW_1/O/W_2$ 型多重乳液稳定性及缓释性能的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(10):56-64.
- Bi Y H, Jia A R, Zhang M S, et al. Effects of konjac glucomannan and whey protein complex on stability and slow release properties of vitamin $CW_1/O/W_2$ multiple emulsion [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10):56-64.
- [11] 于晓慧,庞一帆,王梦阳,等. 壳聚糖-海藻纳米纤维素协同强化海藻酸钠薄膜的制备及其在南美白对虾冷藏保鲜中的应用[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14):243-255.
- Yu X H, Pang Y F, Wang M Y, et al. Development of chitosan-seaweed nanocellulose enhanced alginate packaging film for the refrigerated preservation of the *Litopenaeus vannamei* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14):243-255.
- [12] 付煜峰,张珍. 肉桂精油微胶囊化乳化工工艺优化[J]. 甘肃农业大学学报, 2021, 56(3):168-175.
- Fu Y F, Zhang Z. Optimization of emulsification technology of cinnamon essential oil microcapsules [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2021, 56(3):168-175.
- [13] 卢雪清. 噻唑膦两种微囊悬浮剂的制备及应用[D]. 长春:吉林农业大学, 2023.
- Hu X Q. Preparation and application of Fosthiazate two microcapsules suspensions [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023.
- [14] 郑健姿,岳田利. 魔芋葡甘聚糖为壁材的苹果多酚微胶囊制备及缓释[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(24):48-52.
- Zheng J Z, Yue T L. Preparation of apple polyphenol microcapsules using KGM as wall material and its sustained release [J]. Food Research and Development, 2017, 38(24):48-52.
- [15] 王帅,杨顺贺,杨紫姗,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.
- Wang S, Yang S H, Yang Z S, et al. Optimization on preparation of eugenol sustained-release microcapsules by response surface methodology [J]. Food Science and Technology, 2023, 48(10):234-242.
- [16] 孙月. 碳酸钙包覆肉桂醛微胶囊的制备与表征[D]. 上海:上海应用技术大学, 2020.
- Sun Y. Preparation and characterization of cinnamaldehyde microcapsules coated with calcium carbonate [D]. Shanghai: Shanghai University of Applied Sciences, 2020.
- [17] 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.
- Zhang Y Y, Le Z T, Yu R T, et al. Preparation and characterization of microcapsules of *Lepidium latifolium* L. extract [J]. Journal of Anhui University (Natural Sciences), 2024, 48(4):80-89.
- [18] 刘博,高宁. 响应面法优化真菌 CHS3 发酵产物中柴胡皂苷 d 的提取工艺[J]. 化学工程师, 2023, 37(12):90-95, 100.
- Liu B, Gao N. Optimization of saikosaponin d extraction from CHS3 strain fermentation products by response surface methodology [J]. Chemical Engineer, 2023, 37(12):90-95, 100.
- [19] 张旭鑫,张书艳,赵雷,等. 纳米淀粉对含香茅醇马铃薯淀粉-壳聚糖复合膜材多尺度结构和热稳定性的影响[J]. 轻工学报, 2023, 38(1):27-33.

- Zhang X X, Zhang S Y, Zhao L, et al. Effects of nano-starch on the multiscale structure and thermal stability of potato starch-chitosan composites containing citronellol [J]. *Journal of Light Industry*, 2023, 38(1): 27-33.
- [20] 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.
- He P, Zhang H Y, Kang H B, et al. Preparation and characterization of clove essential oil-loaded chitosan nanoparticles[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(6): 36-42.
- [21] 刘玲红, 许国娟, 程荣, 等. 魔芋葡甘聚糖基栀子黄色素膜的制备及性能研究[J]. *食品科技*, 2021, 46(10): 221-226.
- Liu L H, Xu G J, Cheng R, et al. Preparation and characterization of konjac glucomannan based *Gardenia* yellow pigment film[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(10): 221-226.
- [22] 谭燕, 刘曦, 袁芳. 魔芋葡甘聚糖的结构、性质及其在食品中的应用[J]. *中国调味品*, 2019, 44(2): 168-174, 178.
- Tan Y, Liu X, Yuan F. Structure, properties of konjac glucomannan and its application in food industry [J]. *China Condiment*, 2019, 44(2): 168-174, 178.
- [23] 王帅. 四种不同香料微胶囊的制备及在烟草中的应用[D]. 郑州: 河南农业大学, 2024.
- Wang S. Preparation of four different spice microcapsules and their application in tobacco [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024.
- [24] 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*, 2025, 31(3): 12-22.
- Xu C P, Huang J L, Liu Y S, et al. Preparation of tobacco flavor submicron microcapsules and their application in heated cigarettes [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2025, 31(3): 12-22.
- [25] 任昭辉, 杨天智, 苏亮, 等. 负载丁香酚玉米醇溶蛋白双层微胶囊的制备与表征[J]. *粮食与油脂*, 2025, 38(12): 72-80.
- Ren Z H, Yang T Z, Su L, et al. Preparation and characterization of zein bilayer microcapsules loaded with eugenol [J]. *Cereals & Oils*, 2025, 38(12): 72-80.
- [26] 俞波, 赵炳乾, 倪叶舟, 等. 剪切增稠液微胶囊的制备与性能研究[J]. *中国塑料*, 2024, 38(1): 35-41.
- Yu B, Zhao B Q, Ni Y Z, et al. Preparation and performance investigation of shear thickening liquid microcapsules [J]. *China Plastics*, 2024, 38(1): 35-41.
- [27] 王一行. 藻酸双酯钠缓释片的制备及体外释放特性考察[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- Wang Y X. Preparation and *in vitro* release characteristics of alginate diester sodium sustained-release tablets [D]. Qindao: Ocean University of China, 2014.
- [28] 于波. 基于多孔硅基载药复合材料的构建及其缓释性能研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2023.
- Yu B. Construction of porous silicon-based drug loaded composite materials and study on their sustained release properties [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2023.
- [29] 夏荷. 高球形度海藻酸钙微球制备及其药物释放研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- Xia H. Preparation and drug release study of high sphericity calcium alginate microspheres [D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [30] 杨天智, 王超, 薛野, 等. 海藻酸钠+乳清蛋白/壳聚糖—丁香酚双层微胶囊的制备及缓释[J]. *食品科技*, 2024, 49(9): 250-259.
- Yang T Z, Wang C, Xue Y, et al. Preparation and sustained-release of sodium Alginate + Whey protein/chitosan-eugenol bilayer microcapsules [J]. *Food Science and Technology*, 2024, 49(9): 250-259.
- [31] 杨胜兰. 羧甲基多孔板栗淀粉—海藻酸钠凝胶微球制备及其缓释性能研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2024.
- Yang S L. Preparation and slow-release properties of carboxymethyl porous chestnut starch-sodium alginate gel microspheres [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2024.

Preparation and sustained release of chitosan-konjac glucomannan-based benzyl alcohol microcapsules

Wang Xiaoli¹, Zhu Lifei¹, Li Huijuan¹, Lyu Fengxia¹, Qu Shuhao¹, Tang Fayin¹, Wang Bin², Li Lihong¹

1. College of Veterinary Medicine, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China;

2. Henan Muxiang Biological Co., Ltd., Zhengzhou 451161, China

Abstract: 【Objective】 This study aimed to improve the stability and sustained-release performance of benzyl alcohol. 【Methods】 Benzyl alcohol microcapsules were prepared using chitosan (CS) and konjac glucomannan (KGM) as composite wall materials. The preparation process was optimized by response surface methodology. The microcapsules were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM) and dynamic light scattering (DLS). 【Results】 The results showed that the prepared microcapsules had a spherical morphology and a uniform size distribution. The microcapsules showed good stability and sustained-release performance. The release rate of benzyl alcohol from the microcapsules was significantly lower than that from the free benzyl alcohol. 【Conclusion】 The prepared benzyl alcohol microcapsules could effectively improve the stability and sustained-release performance of benzyl alcohol. (下转第 142 页)

of tobacco core materials at different positions after puff-by-puff smoking. 【Results】During puff-by-puff smoking, the carbonization region of the tobacco core gradually spread from the outer layer of the middle-rear section to the inner layer and the front section with increasing puff number, and the entire tobacco core showed significant carbonization by the end of the smoking session. The pyrolysis process of tobacco core materials could be divided into four stages, among which Stage II was the main mass-loss stage, corresponding to a temperature range of 209~415 °C. Peak A on the DTG curve mainly resulted from the thermal release of chemical components such as glycerol, nicotine, and 1,2-propanediol in the tobacco core materials. With increasing puff number, the maximum mass-loss rate of Peak A on the DTG curve for tobacco core materials at the same position showed an overall decreasing trend. After the fifth puff, the maximum mass-loss rate of Peak A on the DTG curve for tobacco core materials at different positions decreased in the order of front-inner, front-middle, and front-outer in the radial direction, and in the order of front-inner, rear-inner, and middle-inner in the axial direction. During puff-by-puff smoking, the total residual amounts of glycerol, nicotine, and 1,2-propanediol in the tobacco core materials decreased puff by puff. After the smoking session, the total residual amounts of the three components in the tobacco core materials were 21.90%, 2.98%, and 0.31% of their initial contents, respectively. During puff-by-puff smoking, the residual amounts of glycerol, nicotine, and 1,2-propanediol in the tobacco core materials all decreased in the order of inner layer, middle layer, and outer layer in the radial direction, while their decreasing order in the axial direction changed from front section, middle section, and rear section to front section, rear section, and middle section. 【Conclusion】The puff-by-puff changes in the residual amounts of different compounds in tobacco core materials were consistent with their pyrolysis characteristics, and their spatial distribution in the tobacco core materials was affected by temperature and their boiling points.

Key words: heated tobacco product; thermogravimetric analysis; GC-FID; spatial characterization

[责任编辑:刘丹丹]

(上接第 58 页)

(SEM), and field-emission transmission electron microscopy (FETEM). The sustained-release performance was investigated using three kinetic models: first-order kinetics, Higuchi kinetics, and Peppas kinetics. 【Results】Using KGM dosage, Tween 80 dosage, and sodium tripolyphosphate (STP) dosage as independent variables and the loading efficiency of benzyl alcohol microcapsules as the dependent variable, response surface methodology was applied to determine the optimal preparation conditions: KGM, 0.10 g; Tween 80, 0.25 mL; and STP, 0.50 g. Under these conditions, the loading efficiency of the benzyl alcohol microcapsules reached 16.95%. FTIR showed that the characteristic absorption peaks of benzyl alcohol, CS, and KGM appeared at 1040 cm^{-1} , 2880 cm^{-1} , and 874 cm^{-1} , respectively, confirming that all three components were present in the microcapsule system. SEM and FETEM revealed that the microcapsules exhibited a spherical morphology with granular protrusions. At both room temperature (20 °C) and high temperature (80 °C), the microcapsules significantly reduced the volatilization loss of benzyl alcohol, and their sustained-release process followed first-order and Peppas kinetic equations. 【Conclusion】The thermal stability and sustained-release performance of benzyl alcohol were significantly improved after microencapsulation.

Key words: benzyl alcohol; microcapsules; konjac glucomannan; chitosan; response surface optimization; sustained release

[责任编辑:杨晓娟]