



户翊涵,高子婷,李学斌,等.牛肉香精微胶囊制备及其缓释性能研究[J].轻工学报,2026,41(2):64-77.
HU Y H, GAO Z T, LI X B, et al. Study on preparation and sustained-release properties of beef flavor
microcapsules[J]. Journal of Light Industry, 2026, 41(2): 64-77. DOI: 10.12187/2026.02.006

牛肉香精微胶囊制备及其缓释性能研究

户翊涵¹,高子婷¹,李学斌²,柴应霞²,肖梦兰¹,崔冰¹,赵铭钦¹

1. 河南农业大学烟草学院,河南 郑州 450046;
2. 河南京华食品科技开发有限公司,河南 焦作 454850

摘要:【目的】解决传统牛肉香精挥发性成分易损失、热稳定性差、释放不可控等问题。【方法】采用包络结合合法制备牛肉香精微胶囊,通过单因素试验和响应面试验优化其制备工艺,并研究其微观形貌、结构、热稳定性、贮藏稳定性、缓释性能等。【结果】牛肉香精微胶囊的最佳制备工艺为以 β -环糊精为壁材、壁芯比7.8:1、进风口温度140℃、出风口温度90℃,在此条件下微胶囊的包埋率高达71.35%;牛肉香精微胶囊为表面不规则、有褶皱凹陷、颗粒相互连结、尺寸明显变小的团聚结构,在250℃以下表现出良好的热稳定性,贮藏30d后牛肉香精的保留率为85.34%;在100℃条件下,牛肉香精微胶囊可实现香气分子的缓慢稳定释放,并在5min达到平衡,最终释放率为8.08%;牛肉香精微胶囊的释放符合BoxLucas1动力学方程;相较于未包埋的牛肉香精,牛肉香精微胶囊及其水溶液的形态((8.4±0.7)分)、香气仿真度((16.5±1.1)分)、汤汁感((17.1±1.9)分)等感官指标的得分均有提高。【结论】该优化工艺下制备的牛肉香精微胶囊是一种热稳定性和缓释性能俱佳,并能有效提升感官品质的风味包埋体系。

关键词:牛肉香精;微胶囊;包络结合法;热稳定性;缓释性能

中图分类号:TS202.3 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2026)02-0064-14

0 引言

在现代食品工业生产中,肉味香精是改善肉制品风味品质的核心添加剂之一,其产品体系已形成基于不同肉类风味特征开发的细分品类,如猪肉香精、鸡肉香精、牛肉香精等,此类香精通过模拟相应肉类的天然风味特征,满足了多样化肉制品的生产需求。牛肉香精作为肉味香精体系中极具代表性的品类,因烤香浓郁、香气层次丰富且与真实牛肉

风味高度接近的突出优势,已成为食品工业中不可或缺的风味组分^[1],广泛应用于调理肉制品(如腌制牛排、重组肉串),方便食品(如方便面调料包、速冻微波餐),调味料(如牛肉风味酱、复合汤料)等产品的生产中。然而,传统牛肉香精在实际生产应用中存在挥发性强、热敏感性高、易氧化等问题,其风味呈现高度依赖多种特征香气成分,如醛类(己醛、壬醛),含硫化合物(甲硫醇、二甲基三硫),杂环化合物(2-甲基-3-呋喃硫醇)等。这些香气成分在

收稿日期:2025-09-01;修回日期:2025-11-24;出版日期:2026-04-15

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(22406049);河南京华食品科技开发有限公司研发项目(JH2025001)

作者简介:户翊涵(2003—),女,河南省汝州市人,河南农业大学硕士研究生,主要研究方向为香精缓控释技术。E-mail: 18037590750@163.com

通信作者:赵铭钦(1964—),男,河南省新密市人,河南农业大学教授,博士,主要研究方向为香精缓控释技术。E-mail: zhaomingqin@126.com

高温蒸煮、烘烤等食品加工环节及后续贮藏过程中极易受温度、氧气、光照等因素影响而发生氧化或降解;此外,它们还可能与肉制品中蛋白质、脂肪等其他基质组分发生反应^[2],或被包装材料吸附,导致风味物质损失。同时,牛肉香精中的挥发性香气成分在肉制品烹饪初期即大量挥发,致使最终产品风味强度不足,感官品质失衡。因此,提高牛肉香精挥发性风味成分的稳定性并实现其可控释放,已成为食品加工领域亟待解决的关键问题之一。

微胶囊技术是指将固体、液体或气体物质包裹于微小胶囊中,改善被包裹物质的表面特性,提升其不同环境中的稳定性并实现可控释放的技术^[3-4]。微胶囊通常由芯材(被包埋物料)和壁材(成膜高分子材料)两部分组成^[5-7]。壁材通过形成半透膜或密封膜结构,实现芯材与外界环境的隔离^[8],并在特定条件下通过渗透、溶解或囊膜破裂等方式实现芯材的定向释放^[9]。目前,微胶囊的常用制备方法包括复合凝聚法^[10]、包络结合法、单凝聚法^[11]、界面聚合法^[12]等。其中,包络结合法通过主客体分子之间的范德华力、氢键、疏水效应等物理相互作用将芯材分子包裹在壁材特定空间结构内,形成稳定的微胶囊。该方法无需使用有机溶剂,通过分子尺寸匹配实现芯材的精准包合,所制备的微胶囊具有生物利用度高、稳定性好等优点^[13],且工艺简单、成本可控,经济性优势显著。

β -环糊精是一种无毒无害且价格低廉的天然原料,广泛应用于食品工业领域中,其内部疏水、外部亲水的空腔结构,使其成为包络结合法制备微胶囊的优良壁材。以 β -环糊精为壁材时,香味成分可通过 β -环糊精内腔的疏水亲脂特性及空间匹配效应进入其空腔,形成稳定的包合物^[14-16]。该包合物在干燥状态下结构稳定,有利于后续的贮藏与应用。S. Ho等^[17]采用包络结合法对比了 β -环糊精、羟丙基- β -环糊精、甲基- β -环糊精这3种壁材对儿茶素的包合效果,发现以 β -环糊精为壁材时能更有效地保护儿茶素免受温度、光和氧气的影响,更好地维持儿茶素的稳定性。吴少杰等^[18]利用 β -环糊精包埋南极磷虾油,成功掩蔽了磷虾油的腥味,并

提升了其氧化稳定性。此外,T. Aree^[19]的研究证实,以 β -环糊精为壁材包合抗抑郁药 SSRIs,可提高其热稳定性,并降低其副作用。目前,以 β -环糊精为壁材并采用包络结合法制备微胶囊的研究多集中于药物递送、功能性成分保护等领域,而采用该方法提升牛肉香精在加工与贮藏过程中风味稳定性的研究却鲜有报道。

鉴于此,本文拟采用包络结合法,以 β -环糊精为壁材、牛肉香精为芯材制备牛肉香精微胶囊,通过分析其微观形貌、结构、热稳定性、贮藏稳定性、缓释性能等,并结合感官质量评价,解决牛肉香精挥发性强、热敏感性高等问题,以期为实现其高效稳定生产与应用,促进行业降本增效与产品创新提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

玉米淀粉(试剂级)、辛烯基琥珀酸淀粉钠(纯度99%)、 β -环糊精(纯度98%)、吐温80(生物技术级)、2-辛醇(色谱级),上海麦克林生化科技股份有限公司;牛肉香精(红烧牛肉风味),河南京华食品科技开发有限公司;二氯甲烷(分析纯),天津市富宇精细化工有限公司;无水 Na_2SO_4 (分析纯),国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

FJ200-SH型实验室数显高速分散均质机,上海沪析实业有限公司;CCA-20型低温冷却水循环泵,巩义市予华仪器有限责任公司;SHB-D(Ⅲ)系列循环水多用真空泵,河南省泰斯特仪器有限公司;N-1300型旋转蒸发仪、OSB-2200型油浴锅,上海爱朗仪器有限公司;SD-Basic型喷雾干燥仪,英国LabPlant公司;GeminiSEM 300型场发射扫描电子显微镜(FESEM),德国Carl Zeiss AG公司;Nicolet iS20型傅里叶红外光谱(FTIR)仪,美国Thermo Fisher Scientific公司;TGA 1-热重分析仪,瑞士梅特勒公司;顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱联用(HS-SPME-GC-MS)仪,具有FAS-3823顶空自动进样器,郑州安诺科学仪器有限公司;7890A-5977B型GC-MS仪,美国Agilent公司。

1.3 实验方法

1.3.1 牛肉香精微胶囊制备 参考曹嘉玥等^[20]的方法,采用包络结合法制备牛肉香精微胶囊,并稍作修改。将5 g 壁材加入纯水中,在65 ℃条件下加热溶解,混合均匀,得到水相;将1 g 牛肉香精与0.1 g 吐温80在55 ℃条件下加热搅拌3.0 h,充分混合,得到油相;在10 000 r/min的高速剪切条件下,将油相缓慢滴加至水相中,剪切均匀后得到牛肉香精乳液;将该乳液进行喷雾干燥,得到牛肉香精微胶囊。喷雾干燥仪参数如下:进风口温度为160 ℃,出风口温度为90 ℃,进料速率为5.0 mL/min。

1.3.2 单因素试验 壁材种类是决定微胶囊包埋效果的关键,玉米淀粉是最常见的壁材,具有较好的透明度与成膜性^[21];β-环糊精因其特殊的空腔结构,对小分子风味物质具有出色的包合作用^[22];辛烯基琥珀酸淀粉钠是常用的改性淀粉,具有优良的乳化性和成膜性^[23],已广泛应用于微胶囊化。因此,选择这3种具有代表性的壁材进行试验。壁芯比是影响包埋率的核心工艺参数之一,其微小变化可能显著影响包埋率^[24]。进风口温度、出风口温度和进料速率这3个喷雾干燥工艺参数通常与包埋率在一定区间内呈线性或简单的抛物线关系^[25]。在壁材溶解温度为65 ℃、牛肉香精与吐温80在55 ℃条件下的搅拌时间为3.0 h等基础上,以牛肉香精为芯材,包埋率为指标,对壁材种类(玉米淀粉、β-环糊精和辛烯基琥珀酸淀粉钠)、壁芯比(3:1、5:1、7:1、9:1)、进风口温度(120 ℃、140 ℃、160 ℃)、出风口温度(80 ℃、90 ℃、100 ℃)、进料速率(4.0 mL/min、5.0 mL/min、6.0 mL/min)这5个因素进行单因素试验。

1.3.3 响应面试验 在单因素试验的基础上,以包埋率(*Y*)为响应值,选取对包埋率影响较大的壁芯比(*A*)、进风口温度(*B*)和出风口温度(*C*)为自变量进行编码,设置三因素三水平共17个试验点的响应面试验,进一步优化牛肉香精微胶囊的制备工艺。响应面试验因素和水平见表1。

1.3.4 包埋率测定 参考Z. Y. Wang等^[26]的方法,并稍作修改。称取0.1 g 牛肉香精微胶囊于三角瓶中,加入20 mL 二氯甲烷,振荡1 min后过滤,

向滤液中加入适量无水Na₂SO₄脱水,再次过滤至已称重的圆底烧瓶(空瓶质量为*m*₀/g)中,旋转蒸发后,称量烧瓶与残留物质量,记为*m*₁/g。另称取0.1 g 牛肉香精微胶囊于三角瓶中,加入20 mL 二氯甲烷,于30 ℃条件下振荡30 min后过滤,后续脱水及旋蒸操作同前,相应空瓶质量记为*m*₂/g,旋蒸后总质量记为*m*₃/g。包埋率计算公式如下:

$$\text{包埋率} = \left(1 - \frac{m_1 - m_0}{m_3 - m_2}\right) \times 100\%$$

1.3.5 牛肉香精微胶囊表征 1) 微观形貌观察。将牛肉香精微胶囊经真空喷金处理后置于FESEM样品台上观察其微观形貌,设置加速电压为3 kV,电流为75 mA,并分别在放大500倍和5000倍时采集图像。

2) FTIR测定。参考K. Zhang等^[27]的方法,将牛肉香精微胶囊与KBr以质量比1:60混合,研磨后平铺于压片机上压片。将制备好的薄片在室温、4000~400 cm⁻¹条件下进行FTIR分析,扫描频率为2 cm⁻¹,每个样品累计扫描次数为32次。

1.3.6 牛肉香精微胶囊热稳定性测定 使用热重分析仪测定牛肉香精微胶囊的热稳定性。称取3~4 mg 牛肉香精微胶囊于Al₂O₃坩埚中,在N₂氛围下(气体流速50 mL/min)以10 ℃/min的升温速率从30 ℃升温至800 ℃,记录牛肉香精微胶囊的质量变化曲线。

1.3.7 牛肉香精保留率测定 称取0.1 g 牛肉香精微胶囊于培养皿中,在25 ℃条件下密封贮藏30 d。参照1.3.4中的方法,分别称量贮藏前后牛肉香精微胶囊所含牛肉香精的质量,按下式计算牛肉香精的保留率。

$$\text{保留率} = \frac{\text{贮藏后牛肉香精质量}}{\text{贮藏前牛肉香精质量}} \times 100\%$$

表1 响应面试验因素和水平
Table 1 Factors and levels of response surface experiment

水平	因素		
	<i>A</i>	<i>B</i> /℃	<i>C</i> /℃
-1	5:1	120	80
0	7:1	140	90
1	9:1	160	100

1.3.8 牛肉香精微胶囊水分含量测定 称取 1 g 牛肉香精微胶囊样品,置于 105 ℃ 烘箱中烘干至恒重,取出后转入干燥器内,冷却至室温(25 ℃)后称重。按下式计算牛肉香精微胶囊的水分含量($W_i/\%$)。

$$W_i = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100\%$$

式中, W_0 为初始牛肉香精微胶囊质量/g, W_1 为恒重后牛肉香精微胶囊质量/g。

1.3.9 牛肉香精微胶囊释放率测定 采用 HS-SPME-GC-MS 仪检测牛肉香精及其微胶囊在 100 ℃ 的香气成分含量,以评价该微胶囊的释放性能。分别称取 0.5 g 牛肉香精微胶囊及等包埋质量的牛肉香精纯品至 20 mL 固相微萃取瓶中,向每个样品瓶中加入 1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的 2-辛醇作为内标物;使用配备聚四氟乙烯衬垫的硅橡胶盖密封采样瓶,以防止样品挥发及外界杂质干扰。测试条件如下:老化温度为 250 ℃,孵化器温度为 100 ℃,老化时间为 5 min,萃取时间为 5 min,进样时间为 5 min,搅拌间隔为 30 s,搅拌时间为 120 s,样品瓶加热时间为 5 min。

GC 条件:色谱柱为 Agilent 19091 S-433UI 毛细管柱。进样后,起始柱温 38 ℃ 保持 4 min,再以 4 ℃/min 升温至 140 ℃ 保持 2 min,接着以 4 ℃/min 升温至 180 ℃ 保持 2 min;不分流,载气为高纯 N_2 ,流速为 0.8 mL/min;进样口温度为 230 ℃,检测器温度为 250 ℃。

MS 条件:离子源类型为 EI 离子源,电子能量为 70 eV,质量扫描范围(m/z)为 35~550 amu,离子源温度为 230 ℃,四极杆温度为 150 ℃。

将样品(牛肉香精,牛肉香精微胶囊)在 100 ℃ 条件下分别平衡 0 min、1 min、2 min、3 min、4 min 和 5 min,通过 HS-SPME-GC-MS 仪检测香气成分的峰面积,并按下式计算释放率^[28]。

$$\text{释放率} = \frac{S_2}{S_1} \times 100\%$$

式中, S_1 为样品中所有香气成分的总峰面积, S_2 为样品中单个香气成分的峰面积。

1.3.10 感官评价 招募 7 位河南农业大学香料香精技术与工程专业经过系统训练、身体健康的学生

组成感官评定小组,所有评价员在实验前充分了解实验流程及样品情况,并签署书面知情同意书。感官评价参照已有文献^[29]报道进行,将 0.25 g 牛肉香精微胶囊样品分装于洁净的玻璃器皿中,对照组为牛肉香精微胶囊等包埋质量的牛肉香精纯品。感官评价分为 2 个阶段:首先由评价员对样品的颜色、形态、香气仿真度和香气强度进行感官评价;然后向各样品中分别注入 25.00 mL 80 ℃ 纯水,待样品充分溶解后,对各组水溶液的汤汁感和回味感进行感官评价。具体感官评价标准见表 2。

1.4 数据处理

所有实验均重复 3 次,结果以(平均值 \pm 标准差)表示。采用 Excel 2021 整理实验数据,运用 SPSS 27.0 进行单因素试验显著性分析,利用 Design-expert 13 进行响应面试验设计,通过 Origin 2019 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果分析

单因素试验结果如图 1 所示。由图 1a)可知,当壁材为 β -环糊精时,牛肉香精微胶囊的包埋率最高,为 59.88%;而壁材为玉米淀粉和辛烯基琥珀酸

表 2 感官评价标准
Table 2 Sensory evaluation criteria

项目	评价标准	得分/分
颜色	白色	8~10
	偏黄	4~7
	棕色较深	1~3
形态	均匀粉末状、无结块	12~15
	粉末状、有结块	6~11
	明显吸潮结块	1~5
香气仿真度	和红烧牛肉香气一致	16~20
	有牛肉香气,但仿真度一般	8~15
	仿真度较差,牛肉香气不明显	1~7
香气强度	较弱,香气较淡	16~20
	较强,香气较浓	8~15
	非常强烈的牛肉香气	1~7
汤汁感	浓郁的肉汤感,牛肉脂香突出	16~20
	有肉汤感,牛肉脂香浓	8~15
	牛肉脂香较弱,杂味重	1~7
回味感	回味鲜香、绵长、持久	12~15
	留香不够持久	6~11
	香气很快消失,无回味感	1~5

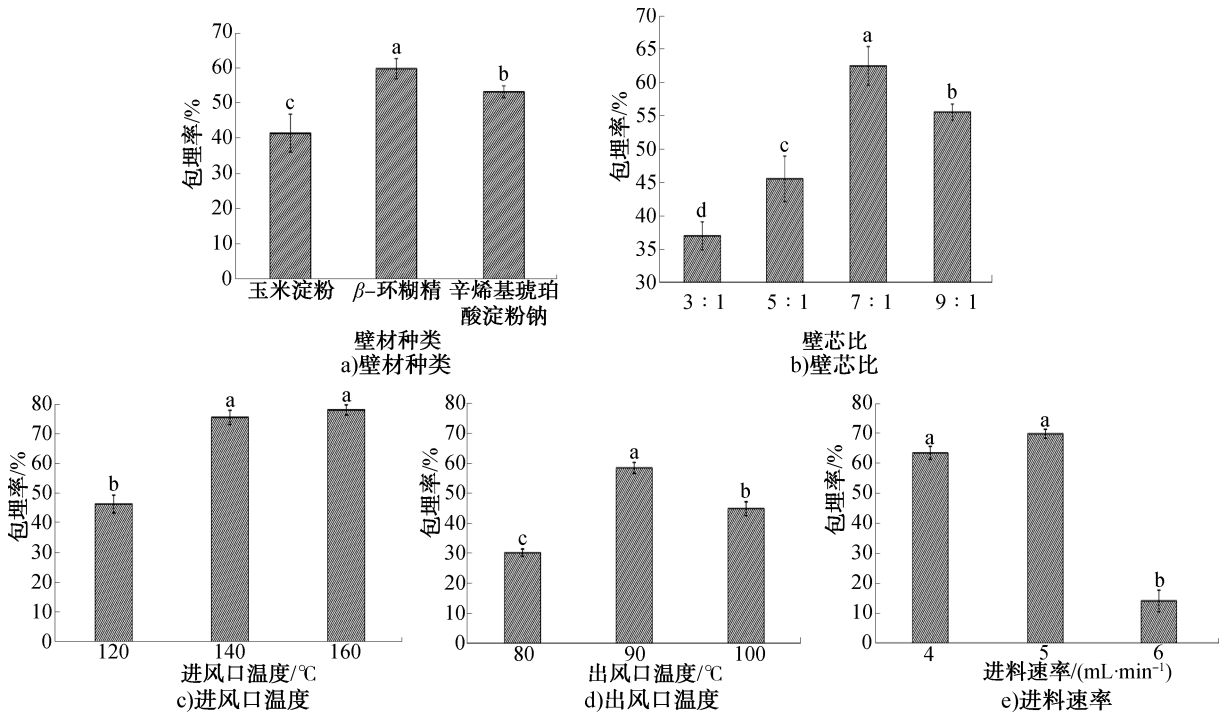


图1 单因素试验结果

Fig. 1 Results of single-factor experiments

淀粉钠时,牛肉香精微胶囊的包埋率分别为41.56%和53.30%。这可能是因为 β -环糊精具有内疏水、外亲水的特殊空腔结构,能够将芯材作为客体分子包裹在其内部,并通过非共价键相互作用形成稳定的包合物。相比之下,玉米淀粉因其黏度高、晶体结构致密,存在干燥成型困难等问题^[30];而辛烯基琥珀酸淀粉钠在承载较多芯材时,溶液黏度会显著升高,导致雾化与干燥过程受阻,易引发粘壁现象和囊壁结构缺陷,最终影响产品得率与品质^[31]。因此,选择 β -环糊精为壁材较适宜。

由图1b)可知,随着壁芯比的增大,牛肉香精微胶囊的包埋率呈先增大后减小的趋势。当壁芯比为7:1时,牛肉香精微胶囊的包埋率最高,为62.50%,随着壁芯比进一步增大,包埋率反而减小。这可能是因为当芯材用量一定时,壁材过量会导致壁层过厚,而芯材相对不足,难以有效支撑微胶囊的整体结构,微胶囊在干燥过程中易发生塌陷、破裂,进而造成包埋率降低^[32]。因此,选择壁芯比为7:1较适宜。

由图1c)可知,随着进风口温度的增加,牛肉

香精微胶囊的包埋率呈不断升高的趋势。当进风口温度为160℃时,包埋率最高,为78.13%。这可能是因为适宜的高温能促使壁材快速定型,形成致密的囊壁结构,从而更有效地防止牛肉香精在干燥过程中逸散。而过高的温度可能会导致牛肉香精的醛类、酮类、含硫化合物等主要风味物质发生热降解^[33],造成芯材损失,导致产品劣变,感官品质下降。因此,选择进风口温度为160℃较适宜。

由图1d)可知,随着出风口温度的增加,牛肉香精微胶囊的包埋率呈先升高后降低的趋势。当出风口温度为90℃时,包埋率最高,为58.51%。这可能是因为出风口温度过低时,微胶囊乳液干燥不充分,影响囊壁结构形成;而出风口温度过高时,会导致微胶囊体系中的水分迅速蒸发,壁材浓度急剧增大,同时加剧芯材挥发,共同造成包埋率降低。因此,选择出风口温度为90℃较适宜。

由图1e)可知,随着进料速率的增加,牛肉香精微胶囊的包埋率呈先升高后降低的趋势。当进料速率为5.0 mL/min时,包埋率最高,为70.03%;当进料速率进一步增大时,包埋率急剧下降。这可能

是因为进料速率过快,微胶囊乳液未干燥完全,壁材未能完全固化且仍残留部分溶剂,使其表面保持较高黏性,易粘在管壁和出样口^[34]。此外,出样口的机械剪切作用会直接撕裂未完全固化的囊壁结构,造成芯材泄漏,破坏微胶囊结构的完整性,导致包埋率降低。因此,选择进料速率 5 mL/min 较适宜。

2.2 响应面试验结果分析

2.2.1 响应面优化

响应面试验设计及结果见表 3,回归方程方差分析见表 4。对响应面试验结果进行回归分析,得到回归方程 $Y = 70.93 + 4.81A + 0.27B + 0.98C - 1.69AB - 1.47AC + 7.84BC - 6.39A^2 - 16.66B^2 - 16.81C^2$ 。由表 4 可知,该模型 $P < 0.01$,具有极显著性;失拟项 $P = 0.9078 > 0.05$,不显著,表明该模型对试验数据的拟合效果良好,试验误差较小,模型可靠。3 个因素对牛肉香精微胶囊包埋率影响的顺序依次为 $A > C > B$,即壁芯比 $>$ 出风口温度 $>$ 进风口温度。

根据回归方程对壁芯比(A)、进风口温度(B)和出风口温度(C)两两之间的交互作用进行分析,各因素交互作用对包埋率影响的响应面图及等高线图如图 2 所示。由图 2 可知,3 个因素两两交互作用的等高线图均为椭圆形,表明这 3 个因素两两之间的交互作用明显。

2.2.2 模型验证

牛肉香精微胶囊的最佳制备工艺为壁芯比 7.75 : 1、进风口温度 139.83 °C 和出风口温度 90.11 °C,此条件下模型预测的牛肉香精微胶囊包埋率为 71.84%。考虑到实际操作的可行性,将最终制备工艺设定为壁芯比 7.8 : 1、进风口温度 140 °C 和出风口温度 90 °C,进行 3 次验证实验,得到实际包埋率的平均值为 71.35%,与预测值拟合度达 99.32%,表明响应面法优化的牛肉香精微胶囊制备工艺可行。

2.3 牛肉香精微胶囊表征结果分析

2.3.1 FESEM 分析

β -环糊精和牛肉香精微胶囊的 FESEM 图如图 3 所示。由图 3a) 和 b) 可知, β -环糊精呈现表面粗糙、大小不一的块状结构,与戴瑶等^[35]在 β -环糊精制备复合精油微胶囊研究中观察到的形貌一致,表明在缺乏与芯材交联作用的情

况下, β -环糊精呈现无规则块状形貌,且分散性较差。由图 3c) 和 d) 可知,牛肉香精微胶囊呈现表面不规则、有褶皱凹陷、颗粒相互连结、尺寸明显变小的团聚结构,未见囊壁破裂。该形貌特征与赵凤等^[36]报道的 β -环糊精包埋挥发性风味物质后的形貌特征高度吻合,他们发现 β -环糊精包埋香味物质

表 3 响应面试验设计及结果

Table 3 Design and results of response surface experiment

序号	A	B	C	Y/%
1	1	0	1	54.11
2	-1	0	-1	38.41
3	1	1	0	50.82
4	0	0	0	60.22
5	-1	1	0	45.73
6	0	-1	-1	45.67
7	0	0	0	73.25
8	1	-1	0	53.42
9	-1	-1	0	41.56
10	-1	0	1	46.28
11	0	0	0	74.56
12	0	1	1	44.94
13	0	-1	1	28.98
14	1	0	-1	52.10
15	0	0	0	71.03
16	0	1	-1	30.26
17	0	0	0	75.61

表 4 回归方程方差分析

Table 4 Analysis of variance of regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	3 237.60	9	359.73	14.340	0.001 0	***
A	184.99	1	184.99	7.370	0.030 0	
B	0.56	1	0.56	0.022	0.885 3	
C	7.74	1	7.74	0.310	0.595 8	
AB	11.46	1	11.46	0.460	0.520 8	
AC	8.58	1	8.58	0.340	0.576 9	
BC	246.02	1	246.02	9.810	0.016 6	*
A ²	172.17	1	172.17	6.860	0.034 4	*
B ²	1 168.23	1	1 168.23	46.570	0.000 2	***
C ²	1 190.43	1	1 190.43	47.460	0.000 2	***
残差	175.59	7	25.08			
失拟项	20.41	3	6.80	0.180	0.907 8	不显著
纯误差	155.18	4	38.79			
总离差	3 413.19	16				

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

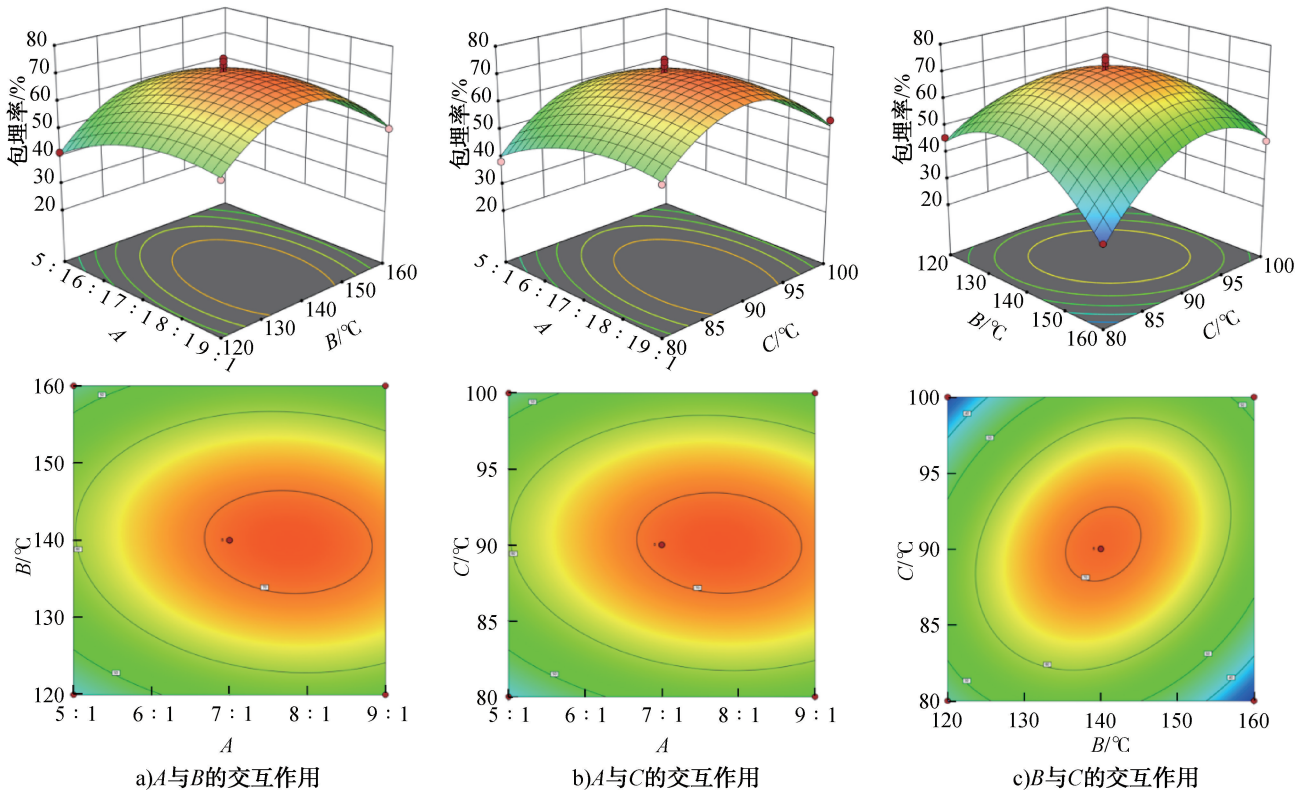


图2 各因素交互作用对包埋率影响的响应面图及等高线图

Fig. 2 Response surface and contour plots for the effects of factor interaction on encapsulation efficiency

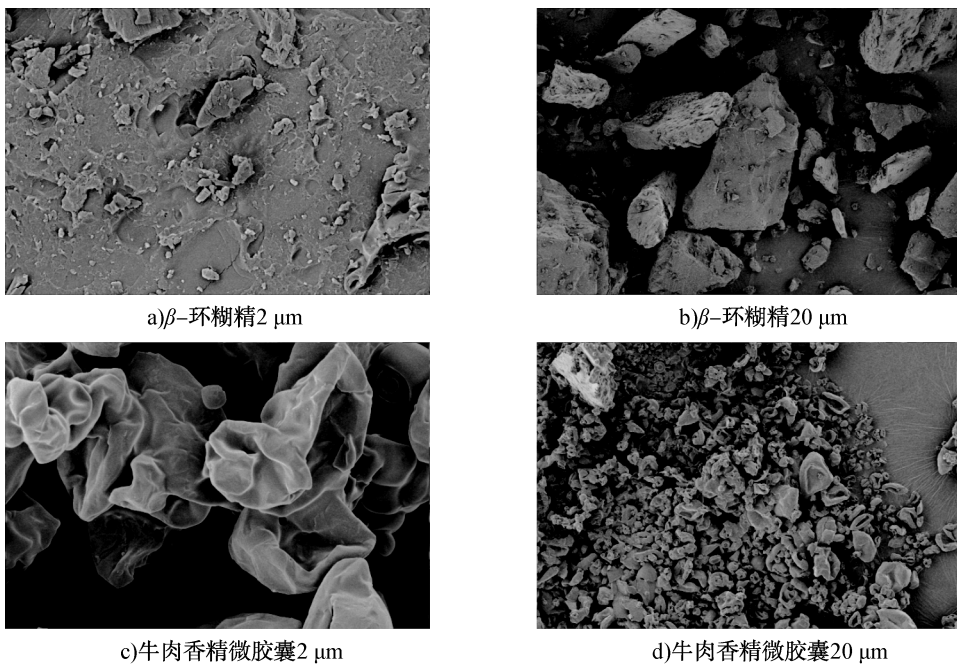


图3 β -环糊精和牛肉香精微胶囊的FESEM图

Fig. 3 FESEM images of β -cyclodextrin and beef flavor microcapsules

后,因芯材与壁材之间的疏水相互作用,微胶囊趋于形成表面粗糙的团聚结构,且颗粒尺寸较 β -环糊精显著减小。上述形貌差异与已有研究较一致,进一步证实牛肉香精微胶囊制备成功。

2.3.2 FTIR 分析 牛肉香精微胶囊的 FTIR 图如图 4 所示。由图 4 可知, β -环糊精在 3414 cm^{-1} 处有 1 个明显的吸收峰,是由—OH 的伸缩振动引起的;在 2927 cm^{-1} 处出现 C—H 的伸缩振动吸收峰,

在 1038 cm^{-1} 处出现 C—O 的不对称伸缩振动吸收特征峰。牛肉香精在 2924 cm^{-1} 处出现 C—H 的不对称伸缩振动吸收特征峰,在 1745 cm^{-1} 处出现 C=O 的伸缩振动吸收峰。在牛肉香精微胶囊的 FTIR 图中,可观察到 3373 cm^{-1} 和 1037 cm^{-1} 处分别出现典型的 β -环糊精—OH 和 C—O 伸缩振动吸收峰,而在 2922 cm^{-1} 和 1751 cm^{-1} 处出现的典型牛肉香精 C—H 和 C=O 伸缩振动吸收峰明显减弱。与 β -环糊精和牛肉香精相比,牛肉香精微胶囊的峰位发生细微的偏移,同时 C—H 和 C=O 伸缩振动吸收峰强度明显减弱,—OH 伸缩振动吸收峰明显变宽,表明牛肉香精与 β -环糊精之间形成了氢键。氢键的形成通常会导致振动频率降低,芯材与壁材之间的相互作用力增强,使得分子在振动过程中需要克服更大的阻力^[37-38],从而导致峰位发生偏移;游离—OH 的振动相对独立,能量均一,峰形较窄,当其与香精分子中的 C=O 形成氢键时,会构成 1 个复杂的氢键网络,这个网络中的氢键键长和键角均存在细微差异,使得羟基的振动频率分布在更宽的范围内,从而导致吸收带变宽^[39]。该现象与谢大明^[40]在研究 β -环糊精包封柠檬皮精油中观察到的结果一致,即芯材进入 β -环糊精空腔后其自由运动受到限制。这表明牛肉香精已成功包封于 β -环糊精的空腔结构中,形成了稳定包合物,这与 FESEM 结果相互印证,共同证实了牛肉香精微胶囊制备成功。

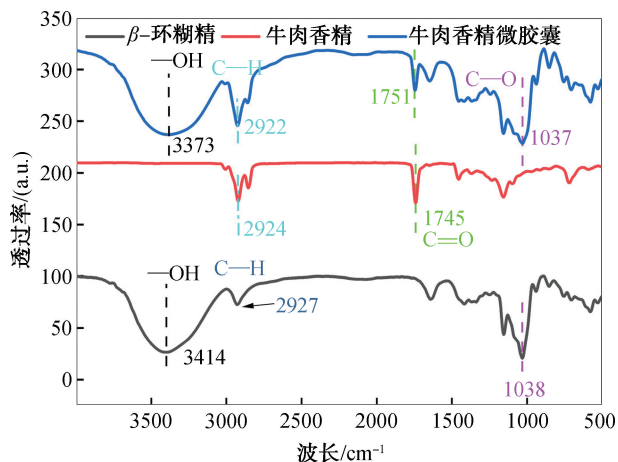


图4 牛肉香精微胶囊的 FTIR 图

Fig. 4 FTIR spectrum of beef flavor microcapsules

2.4 牛肉香精微胶囊热稳定性分析

对牛肉香精微胶囊进行了热重(Thermogravimetry, TG)和微分热重(Derivative Thermogravimetry, DTG)研究,以确定其热稳定性。牛肉香精微胶囊的 TG-DTG 图如图 5 所示。由图 5 可知,牛肉香精在 $134\sim 282\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时发生明显质量损失,主要由香气物质的受热挥发引起;当温度升高至 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,主要是无香气贡献的植物油发生热分解,仅剩总质量的 10% 左右,这与刘恩慧等^[41]的研究中核心活性组分热分解行为较一致。 β -环糊精的失重区间主要有 2 个,第 1 个失重区间是 $40\sim 148\text{ }^{\circ}\text{C}$,主要是水分挥发,质量损失 13.18%;第 2 个失重区间是 $148\sim 797\text{ }^{\circ}\text{C}$,主要是 β -环糊精自身发生热分解,在 $323\text{ }^{\circ}\text{C}$ 达到最大分解速度($-3.85\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$),质量损失 92.75%。牛肉香精微胶囊的失重区间主要有 3 个,第 1 个失重区间是 $40\sim 173\text{ }^{\circ}\text{C}$,微胶囊中水分和表面残留的部分牛肉香精挥发,质量损失 9.04%;第 2 个失重区间是 $173\sim 359\text{ }^{\circ}\text{C}$,主要是微胶囊壁材的化学键发生断裂,其中的牛肉香精受热挥发,在 $321\text{ }^{\circ}\text{C}$ 达到最大分解速度($-2.35\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$),质量损失 61.61%;第 3 个失重区间的温度高于 $360\text{ }^{\circ}\text{C}$,微胶囊中剩余的牛肉香精继续挥发,同时微胶囊壁材开始分解碳化。

与牛肉香精相比,牛肉香精微胶囊中香气物质的失重挥发主要发生在 $173\sim 359\text{ }^{\circ}\text{C}$,且失重区间整体右移。该结果与 Y. Yan 等^[42]的研究结论一致,其在以 β -环糊精包封长叶肉桂精油的研究中发现,未包封的精油在 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 前发生明显质量损失,而包

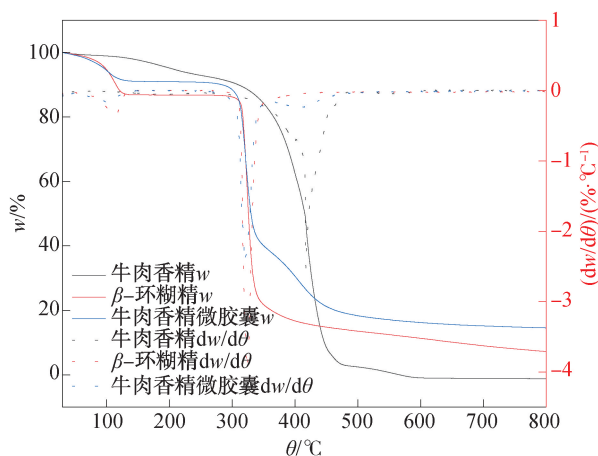


图5 牛肉香精微胶囊的 TG-DTG 图

Fig. 5 TG-DTG curves of beef flavor microcapsules

合物在 310 °C 前质量损失明显减弱,且失重区间右移。这进一步证实 β -环糊精可抑制香气物质的热挥发,增强体系的稳定性,与环糊精包合技术提升挥发性成分热稳定性的普遍规律相符^[43]。综上,以 β -环糊精为壁材可显著提高牛肉香精的热稳定性。

2.5 牛肉香精微胶囊贮藏稳定性分析

密封贮藏 30 d 后,牛肉香精微胶囊中牛肉香精的保留率为 85.34%,该结果与王林^[44]关于黑果腺肋花楸花青素微胶囊在 25 °C 贮藏 30 d 的研究结果较一致。这进一步表明微胶囊技术能够有效提升芯材的贮藏稳定性,有助于延缓牛肉香精的释放,提高其香气保留能力。此外,牛肉香精微胶囊的水分含量为 2.45%,处于 1%~5% 的最佳水分含量区间,这能有效维持微胶囊的结构稳定性和功能活性^[45]。研究^[46]表明,当水分含量低于 1% 时,微胶囊可能因过度脱水而导致囊壁脆性增加,影响活性成分的稳定性;当水分含量超过 5%,则易引发微胶囊形态改变、相互粘连等问题,导致其控释性能下降。

2.6 牛肉香精微胶囊缓释性能分析

牛肉香精微胶囊的主要香气成分及其相对含量见表 5。由表 5 可知,相较于牛肉香精,牛肉香精微胶囊的主要香气成分未发生明显变化,但相对含量有所改变。研究^[47]表明, β -环糊精的空腔结构能够选择性包埋不同大小的香气分子,从而引起各成分相对含量的重新分布。其中,左旋- β -蒎烯相对含量增加,该成分具有独特的松节油香气,有助于延长牛肉香精的保质期并提升其稳定性。在包埋过程中,体系内各香气成分发生部分重排,且部分

微量香气成分有所损失,致使左旋- β -蒎烯的相对含量增加。另一方面,芳樟醇、对甲氧基苯甲醛等物质的相对含量呈轻微下降趋势,这可能是由于牛肉香精进入 β -环糊精空腔后,其香气小分子受到壁材的保护,释放相对受限。这与 A. Herrera 等^[48]研究 β -环糊精包埋肉桂醛和丁香酚表现出的有效保留及更高稳定性的结果一致。因此,检测到的香气成分主要来源于部分受损微胶囊结构所释放的及附着在微胶囊表面的风味小分子物质。这表明微胶囊包埋未破坏牛肉香精主要挥发性香气成分,能够较好地保留这些成分。

牛肉香精主要应用于方便面、速食汤、即热牛排等速食产品,此类产品的食用周期一般在 5 min 左右^[49]。因此,本文选择 5 min 作为释放特性分析时长。特征香气成分是评估微胶囊香气质量和释放效果的重要指标之一^[50]。2-乙酰基噻唑在牛肉香精中主要贡献烤肉和牛肉特征香气,能够增强肉香的真实感和层次感,其香气阈值为 10 $\mu\text{g}/\text{mg}$,在极低浓度即可被人体嗅觉及味觉系统感知^[51]。基于该特征香气成分,牛肉香精微胶囊的释放特性如图 6a) 所示。由图 6a) 可知,在 100 °C 释放测试中,包埋前后牛肉香精中 2-乙酰基噻唑的释放速率均呈现先快速上升后逐渐趋于平稳的趋势,但二者的释放行为存在显著差异。未包埋牛肉香精中 2-乙酰基噻唑的释放率明显高于包埋后牛肉香精,其在 5 min 时的释放率为 21.36%,且各时段释放不均匀;而包埋后牛肉香精的释放更为平缓,在 1 min 时的释放率为 3.56%,5 min 时趋于平缓,释放率为 8.08%,该差异为后续咀嚼和吞咽过程中持续且稳定的风味感知奠定了物质基础。这一现象与载体

表 5 牛肉香精微胶囊的主要香气成分及其相对含量

Table 5 Main aroma components and their relative contents of beef flavor microcapsules

主要香气成分	香味特征	牛肉香精		牛肉香精微胶囊	
		保留时间/min	相对含量/%	保留时间/min	相对含量/%
左旋- β -蒎烯	树脂、松脂香气	13.277	3.40	13.265	9.10
2-乙酰基噻唑	熟肉、烧烤香、焦香	15.666	21.36	15.003	8.08
芳樟醇	清新花香、木香调	18.478	5.61	18.283	1.98
对甲氧基苯甲醛	山楂甜香	24.433	6.06	23.918	2.51
4-甲基-5-羟乙基噻唑	炖煮肉香、坚果香	26.524	8.40	24.752	4.83
β -石竹烯	淡丁香	29.725	5.70	29.473	1.28

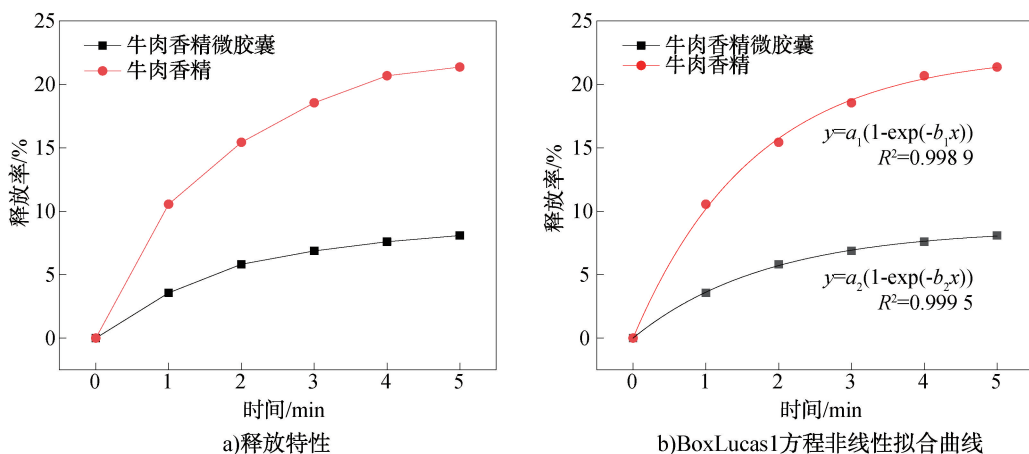


图6 牛肉香精微胶囊的释放特性及 BoxLucas1 方程非线性拟合曲线

Fig. 6 Release characteristics of beef flavor microcapsules and nonlinear fitting curve of BoxLucas1 equation

和风味物质之间的物理化学相互作用密切相关^[52]:微胶囊表面附着的未包埋牛肉香精在 100 ℃ 时立即挥发,而被包埋的牛肉香精则缓慢稳定地释放。本研究结果与 Z. B. Xiao 等^[53]关于西瓜香精微胶囊缓释性能的研究结果较一致。综上,赋予牛肉特征风味的香气成分受包埋处理影响较小,牛肉香精经微胶囊化后表现出优异的缓释特性,其整体风味未发生劣变。

使用 BoxLucas1 动力学方程 $y = a(1 - \exp(-bx))$ 拟合牛肉香精微胶囊在相同温度下不同时间节点的释放数据,结果如图 6b) 所示。由图 6b) 可知,牛肉香精和牛肉香精微胶囊 BoxLucas1 动力学方程的相关性系数(R^2)分别为 0.998 9 和 0.999 5,均大于 0.90,表明该模型的拟合效果均较好,牛肉香精和牛肉香精微胶囊的释放均符合 BoxLucas1 动力学方程,即该模型可较精确地描述和预测牛肉香精和牛肉香精微胶囊的释放规律。

2.7 牛肉香精微胶囊感官评价结果分析

牛肉香精微胶囊的感官评价雷达图如图 7 所示。由图 7 可知,相较于牛肉香精,牛肉香精微胶囊在形态((8.4±0.7)分)、香气仿真度((16.5±1.1)分)、汤汁感((17.1±1.9)分)等关键指标上均有所提升。该结果表明 β-环糊精在维持微胶囊干燥状态(水分含量为 2.45%)的同时,有效保障了其物理稳定性,并完整保留了特征香气成分。该结果与前述包埋率、贮藏稳定性的结果相一致。

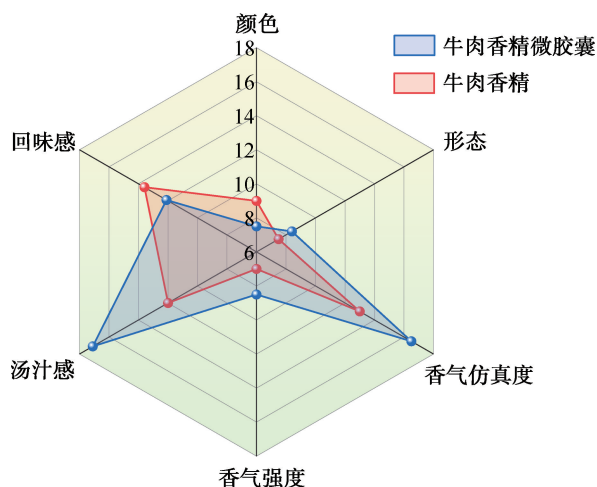


图7 牛肉香精微胶囊的感官评价雷达图

Fig. 7 Sensory evaluation radar chart of beef flavor microcapsules

3 结论

本研究采用包络结合法制备了以 β-环糊精为壁材的牛肉香精微胶囊,系统探究了其制备工艺、微观形貌、结构、热稳定性、贮藏稳定性、释放性能等,得到如下结论:在以 β-环糊精为壁材、壁芯比为 7.8 : 1、进风口温度为 140 ℃ 和出风口温度为 90 ℃ 的工艺条件下,可制得包埋率高达 71.35%、热稳定性和贮藏稳定性良好的牛肉香精微胶囊。该微胶囊体系能够有效保护牛肉香精中的风味成分,将其香气释放行为由快速释放转变为持续、平缓的释放模式,并改善其感官品质。本研究为开发具有高热稳定性和可控释放性能的牛肉香精速食产品提供了参考。后续研究可进一步将上述制备工艺拓展

应用于其他肉类香精体系及慢食制品中,并验证其普适性,以深入探究其在真实食品工业生产中的产业化应用及感官提升效果。

参考文献:

- [1] 郑志亮. 新型牛肉风味膏类咸味香精的工艺及机理研究[D]. 无锡:江南大学,2022.
ZHENG Z L. Study on the technology and mechanism about new type of beef paste of salty flavor[D]. Wuxi: Jiangnan University,2022.
- [2] 丘苑新,曾晓房,李二丽,等. 壳聚糖-三聚磷酸钠微胶囊包埋烤牛肉香精工艺研究[J]. 中国调味品,2013,38(5):90-94.
QIU Y X,ZENG X F,LI E L,et al. Study on embedding technology of roast beef flavor by chitosan and sodium tripolyphosphate microcapsules [J]. China Condiment, 2013,38(5):90-94.
- [3] LOBEL B T,BAIOCCO D,AL-SHARBI M,et al. Current challenges in microcapsule designs and microencapsulation processes: A review [J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2024,16(31):40326-40355.
- [4] 吴凡,郭琳娜,崔耀明,等. 控释型植物精油微胶囊的制备及其机理研究现状[J]. 中国调味品,2025,50(7):228-234.
WU F, GUO L N, CUI Y M, et al. Research status of preparation and mechanism of controlled-release plant essential oil microcapsules [J]. China Condiment, 2025, 50(7):228-234.
- [5] YANG Z L, LUO L, FAN F Y, et al. Preparation and characterization of soy protein isolate/SiO₂ nanocomposite films and their walnut oil microcapsules [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(29):50695.
- [6] 卢艳慧,李迎秋. 微胶囊技术的研究进展及在食品行业中的应用[J]. 中国调味品,2021,46(3):171-174.
LU Y H, LI Y Q. Research progress of microcapsule technology and its application in food industry [J]. China Condiment, 2021, 46(3):171-174.
- [7] KANG Y R, LEE Y K, KIM Y J, et al. Characterization and storage stability of chlorophylls microencapsulated in different combination of gum Arabic and maltodextrin [J]. Food Chemistry, 2019, 272:337-346.
- [8] ZHANG X Z, WANG D, LIU L, et al. Microencapsulation of *Zanthoxylum schinifolium* essential oil through emulsification followed by spray drying: Microcapsule characterization and functional evaluation [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 687:133484.
- [9] LIU C, XU Z B, LIU J F, et al. Enabling direct dense encapsulation of water-insoluble powder in hydrogel microcapsules by bubble-assisted encapsulation method [J]. Materials & Design, 2021, 209:109952.
- [10] 李振杰,熊亚妹,刘远上,等. 复凝聚法制备甜橙油纳米微胶囊的研究[J]. 轻工学报,2022,37(2):44-50.
LI Z J, XIONG Y M, LIU Y S, et al. Study on the preparation of sweet orange oil nanocapsules by complex coacervation [J]. Journal of Light Industry, 2022, 37(2):44-50.
- [11] 王洪玲,刘长霞,郭晶兰,等. 单凝聚法制备壳聚糖硬脂酸钠为壁材的鱼油微胶囊[J]. 中国油脂,2021,46(11):26-30.
WANG H L, LIU C X, GUO J L, et al. Preparation of fish oil microcapsules with chitosan sodium stearate as wall material by single coacervation method [J]. China Oils and Fats, 2021, 46(11):26-30.
- [12] MYTARA A D, CHRONAKI K, NIKITAKOS V, et al. Synthesis of polyamide-based microcapsules via interfacial polymerization: Effect of key process parameters [J]. Materials, 2021, 14(19):5895.
- [13] SARABIA-VALLEJO Á, CAJA M D M, OLIVES A I, et al. Cyclodextrin inclusion complexes for improved drug bioavailability and activity: Synthetic and analytical aspects [J]. Pharmaceutics, 2023, 15(9):2345.
- [14] YILDIZ Z I, CELEBIOGLU A, KILIC M E, et al. Menthol/cyclodextrin inclusion complex nanofibers: Enhanced water-solubility and high-temperature stability of menthol [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 224:27-36.
- [15] ZHU G Y, ZHU G X, XIAO Z B. A review of the production of slow-release flavor by formation inclusion complex with cyclodextrins and their derivatives [J]. Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry, 2019, 95(1):17-33.
- [16] HU J Y, WANG L F, SONG Z G, et al. Preparation and properties of thermal responsive 2, 3-diethyl-5-methylpyrazine fragrance microcapsules with β -CD/CS as wall materials [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 283:137853.
- [17] HO S, THOO Y Y, YOUNG D J, et al. Inclusion complexation of catechin by β -cyclodextrins: Characterization and storage stability [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 86:555-565.
- [18] 吴少杰,吉情,陈进林,等. 包络结合法制备南极磷虾油微胶囊[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2020, 29(1):17-21.
WU S J, JI Q, CHEN J L, et al. Preparation of Antarctic krill oil microcapsule by envelope-combination method

- [J]. Journal of Jiangsu Ocean University(Natural Science Edition), 2020, 29(1): 17-21.
- [19] AREE T. Advancing insights on β -cyclodextrin inclusion complexes with SSRIs through lens of X-ray diffraction and DFT calculation [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2021, 609: 121113.
- [20] 曹嘉玥,李慧敏,李玲,等. 香茅精油及其复配精油微胶囊对红香酥梨常温保鲜效果[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(7): 88-93.
- CAO J Y, LI H M, LI L, et al. Effect of *Citronella* essential oil and its compound essential oil microcapsules on storage of red fragrant pears at normal temperature [J]. Food Research and Development, 2024, 45(7): 88-93.
- [21] 娄海伟,王媛,赵仁勇. 糯玉米淀粉的理化性质及其在食品中的应用研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 120-128.
- LOU H W, WANG Y, ZHAO R Y. Research advances on the physicochemical properties of waxy corn starch and its application in food [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(3): 120-128.
- [22] 曹川,解鹏. β -环糊精与柠檬精油、月桂精油包合物的表征、热稳定性和抑菌性能评价[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(2): 75-82.
- CAO C, XIE P. Characterization, thermal stability and antibacterial performance evaluation of β -cyclodextrin inclusion complexes with lemon essential oil and laurel essential oils [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(2): 75-82.
- [23] 武恺彤,徐建中,齐立军,等. 花椒油微胶囊工艺优化[J]. 中国调味品, 2024, 49(3): 112-117, 124.
- WU K T, XU J Z, QI L J, et al. Optimization of zanthoxylum bungeanum maxim. oil microcapsule process [J]. China Condiment, 2024, 49(3): 112-117, 124.
- [24] 李国良,刘香萍. 肉桂叶精油/ β -环糊精微胶囊的制备及缓释特性[J]. 林产化学与工业, 2021, 41(4): 35-41.
- LI G L, LIU X P. Preparation and slow-release properties of *Cinnamomum cassia* leaves essential oil/ β -cyclodextrin microcapsules [J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2021, 41(4): 35-41.
- [25] WATSON M A, LEA J M, BETT-GARBER K L. Spray drying of pomegranate juice using maltodextrin/cyclodextrin blends as the wall material [J]. Food Science & Nutrition, 2017, 5(3): 820-826.
- [26] WANG Z Y, WANG H S, WANG C Y, et al. Long-acting sustained release microcapsules of oregano essential oil-loaded gelatin/carrageenan for food preservation against *Botrytis cinerea* [J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141680.
- [27] ZHANG K, YUAN D, LI C, et al. Physicochemical properties and bioactivity of polysaccharides from *Sargassum pallidum* by fractional ethanol precipitation [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2021, 56(7): 3536-3545.
- [28] LI W L, ZI L X, XU N M, et al. Identification of characteristic flavor compounds of *Boletus edulis* from different regions based on by E-nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J]. Food Chemistry (X), 2024, 23, 101601.
- [29] 陶缘. 复合凝聚法制备肉味香精微胶囊及其性质研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- TAO Y. Preparation and characterization of meat flavor microcapsule by complex coacervation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [30] 潘雯丽,梁倩,高群玉. 高直链玉米淀粉在食品、食品材料及保健食品中的应用进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(21): 396-404.
- PAN W L, LIANG Q, GAO Q Y. Application of high amylose maize starch in food, food material and health product [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(21): 396-404.
- [31] 张玲云,张敏,杨心怡,等. 大黄鱼鱼卵油微胶囊制备工艺及其性质表征[J]. 食品工业科技, 2020, 41(7): 126-132.
- ZHANG L Y, ZHANG M, YANG X Y, et al. Preparation process and characterization properties of large yellow croaker roe oil microcapsules [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(7): 126-132.
- [32] 孙雪,张蕊,范方宇,等. 复凝聚法制备西番莲果皮花色苷微胶囊及其性质分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(17): 187-193.
- SUN X, ZHANG R, FAN F Y, et al. Preparation and properties of anthocyanin microcapsules from *Passiflora edulis* rind by complex coacervation [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(17): 187-193.
- [33] SUN A, WU W, SOLADOYE O P, et al. Maillard reaction of food-derived peptides as a potential route to generate meat flavor compounds: A review [J]. Food Research International, 2022, 151: 110823.
- [34] 祖力皮克尔·帕依孜拉. 喷雾干燥法可控制备自组装型聚乳酸微胶囊及其应用基础研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2024.
- PAYIZILA Z. Preparation of self-assembled polylactic acid colloidosomes using spray drying method and their fundamental application study [D]. Nanning: Guangxi University, 2024.
- [35] 戴瑶,陈玥璇,张翔,等. 壬醛与香芹酚复合抑菌微胶囊的制备及其对蓝莓的保鲜作用[J]. 食品与发酵工

- 业,2024,50(9):238-247.
- DAI Y, CHEN Y Y, ZHANG X, et al. Preparation of composite antibacterial microcapsules with non-anal and carvacrol and its application in blueberry preservation[J]. Food and Fermentation Industries,2024,50(9):238-247.
- [36] 赵凤,郑旭,周政,等.不同壁材对超声波喷雾-冷冻干燥制备香味缓释微胶囊的影响[J].食品科学,2023,44(22):296-303.
- ZHAO F, ZHENG X, ZHOU Z, et al. Effect of different wall materials on the preparation of sustained-release aroma microcapsules by ultrasonic spray-freeze drying [J]. Food Science,2023,44(22):296-303.
- [37] LIU X, ZHAO Y, NI Y F, et al. Hydroxylated organic semiconductors for efficient photovoltaics and photocatalytic hydrogen evolution[J]. Energy & Environmental Science, 2023,16(9):4065-4072.
- [38] 李华兰.龙脑樟精油的高效分离、抑菌及微胶囊化研究[D].南昌:江西师范大学,2023.
- LI H L. Study on the efficient separation, antifungal activity, and microencapsulation of *Cinnamomum camphora* chvar. *Borneol* essential [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University,2023.
- [39] SERRA P B P, ROCHA M A A, RATHKE B, et al. Infrared spectroscopy of the symmetric branched isomers of n-heptanol [J]. Journal of Molecular Liquids, 2017, 244:528-532.
- [40] 谢大明.柠檬皮精油 β -环糊精包合物的制备及在冷鲜猪肉保鲜中的应用[D].雅安:四川农业大学,2023.
- XIE D M. Preparation of β -cyclodextrin inclusion complex of lemon peel essential oil and its application in preservation of chilled pork [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2023.
- [41] 刘思慧,牛晴,赵仲凯,等.复合凝聚法制备核桃调和油微胶囊理化性质及其结构表征[J].食品科学,2025,46(15):91-101.
- LIU E H, NIU Q, ZHAO Z K, et al. Physicochemical properties and structural characterization of blended walnut oil microcapsules prepared by complex coacervation method [J]. Food Science,2025,46(15):91-101.
- [42] YAN Y, ZHAO X, WANG C, et al. Preparation, optimization, and characterization of inclusion complexes of *Cinnamomum longepaniculatum* essential oil in β -cyclodextrin[J]. Sustainability,2022,14(15):9513.
- [43] ZHOU J J, JIA J L, HE J L, et al. Cyclodextrin Inclusion complexes and their application in food safety analysis: Recent developments and future prospects [J]. Foods, 2022,11(23):3871.
- [44] 王林.黑果腺肋花楸花青素微胶囊的制备及其活性研究[D].长春:长春工业大学,2024.
- WANG L. Preparation and activity research of aroniamelanocarpa anthocyanins microcapsules [D]. Changchun: Changchun University of Technology,2024.
- [45] DOS SANTOS C, BUERA M P, MAZZOBRE M F. Phase solubility studies and stability of cholesterol/ β -cyclodextrin inclusion complexes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2011,91(14):2551-2557.
- [46] 杨济闻,索晓毅,张紫怡,等.槲皮素微胶囊的构建、稳定性及体外消化特性分析[J].食品工业科技,2025,46(24):259-268.
- YANG J W, SUO X Y, ZHANG Z Y, et al. Construction, stability and *in vitro* digestive properties of quercetin microcapsules [J]. Food Industry Science and Technology, 2025,46(24):259-268.
- [47] CHEN H J, LI L, MA Y C, et al. Development of active packaging film containing bioactive components encapsulated in β -cyclodextrin and its application [J]. Food Hydrocolloids,2019,90:360-366.
- [48] HERRERA A, RODRÍGUEZ F J, BRUNA J E, et al. Antifungal and physicochemical properties of inclusion complexes based on β -cyclodextrin and essential oil derivatives [J]. Food Research International,2019,121:127-135.
- [49] KIM Y M, LEE K, LEE Y, et al. Thermoresponsive semi-interpenetrating gelatin-alginate networks for encapsulation and controlled release of scent molecules [J]. International Journal of Biological Macromolecules,2022,208:1096-1105.
- [50] SAIFULLAH M, SHISHIR M R I, FERDOWSI R, et al. Micro and nano encapsulation, retention and controlled release of flavor and aroma compounds: A critical review [J]. Trends in Food Science & Technology,2019,86:230-251.
- [51] 魏萌.黄牛肉关键风味成分鉴定及其与肌原纤维蛋白的互作机制[D].北京:中国农业科学院,2023.
- WEI M. Identification of key flavor components of Chinese yellow cattle beef and the interaction mechanism with myofibrillar proteins [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences,2023.
- [52] GUICHARD E. Interactions between flavor compounds and food ingredients and their influence on flavor perception [J]. Food Reviews International,2002,18(1):49-70.
- [53] XIAO Z B, HOU W J, KANG Y X, et al. Encapsulation and sustained release properties of watermelon flavor and its characteristic aroma compounds from γ -cyclodextrin inclusion complexes [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97:105202.

Study on preparation and sustained-release properties of beef flavor microcapsules

HU Yihan¹, GAO Ziting¹, LI Xuebin², CHAI Yingxia², XIAO Menglan¹, CUI Bing¹, ZHAO Mingqin¹

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

2. Henan Jinghua Food Technology Development Co., Ltd., Jiaozuo 454850, China

Abstract: **[Objective]** To solve the problems including easy loss of volatile components, poor thermal stability and uncontrollable release of traditional beef flavor. **[Methods]** The beef flavor microcapsules were prepared via the inclusion combination method, and their preparation process was optimized by single-factor tests and response surface methodology. Meanwhile, the micromorphology, structure, thermal stability, storage stability and sustained-release properties of the microcapsules were systematically investigated. **[Results]** The optimal preparation parameters of beef flavor microcapsules were determined as follows: β -cyclodextrin as wall material, wall-core ratio of 7.8 : 1, air inlet temperature of 140 °C and air outlet temperature of 90 °C, under which the encapsulation efficiency of the microcapsules reached as high as 71.35%. The microcapsules presented an agglomerated structure with irregular surfaces, folded depressions, interconnected particles and obviously reduced particle size, and exhibited favorable thermal stability below 250 °C. The retention rate of beef flavor in the microcapsules was 85.34% after 30 days of storage. At 100 °C, the beef flavor microcapsules enabled slow and stable release of aroma molecules, reached equilibrium at 5 minutes, and the final release rate was 8.08%. The release of the microcapsules fitted the BoxLucas1 kinetic equation. Compared with unencapsulated beef flavor, the sensory scores of the beef flavor microcapsules and their aqueous solution were improved in terms of appearance (8.4 ± 0.7), aroma simulation degree (16.5 ± 1.1) and soup-like taste (17.1 ± 1.9). **[Conclusion]** The beef flavor microcapsules prepared via the optimized process are a promising flavor encapsulation system with superior thermal stability and sustained-release properties, which can effectively enhance the sensory quality of beef flavor.

Key words: beef flavor; microcapsules; inclusion combination method; thermal stability; sustained-release property

[责任编辑:杨晓娟 申慧珊]