

氧化玉米淀粉/明胶复合胶囊壳的制备与表征

Preparation and characterization of oxidized corn starch/gelatin composite capsules

谭 心¹ 梁春艳¹ 邓松林² 陈启杰¹ 罗永清³

TAN Xin¹ LIANG Chunyan¹ DENG Songlin² CHEN Qijie¹ LUO Yongqing³

(1. 长沙理工大学化学化工学院, 湖南 长沙 410076; 2. 湖南工业职业技术学院机械工程学院,

湖南 长沙 410000; 3. 岳阳天添胶囊股份有限公司, 湖南 岳阳 414000)

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410076, China; 2. College of Mechanical Engineering, Hunan Industry Polytechnic, Changsha, Hunan 410000, China; 3. Yueyang Tiantian Capsule Co., Ltd., Yueyang, Hunan 414000, China)

摘要:目的:采用改性淀粉与明胶共混制备胶囊壳,降低胶囊壳制备成本。方法:以玉米原淀粉为原料,采用15%用量的过氧化氢氧化制备氧化玉米淀粉,与明胶共混,分别通过流延法和浸渍法制备了氧化玉米淀粉/明胶复合胶囊膜和胶囊壳,并采用傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)对其进行表征。结果:当氧化玉米淀粉与明胶质量比为5:5,制备的氧化玉米淀粉/明胶复合胶囊壳的干燥失重在13.0%~15.0%,在蒸馏水和模拟人工胃液中的崩解时限在10 min以内,脆碎度不超过5粒。结论:采用氧化玉米淀粉与明胶共混制备的复合胶囊壳性能符合《中国药典》(2020)要求。

关键词:氧化玉米淀粉;明胶;胶囊壳;制备;表征

Abstract: Objective: Modified starch was used to mix with gelatin to prepare the capsule shell, and the cost of preparing the capsule shell was reduced. Methods: Oxidized corn starch prepared by using 15% hydrogen peroxide was used as raw material to mix with part of gelatin. The oxidized corn starch/gelatin composite film and capsules were prepared by casting method and impregnation method, respectively, and were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), X-ray diffraction (XRD) and Scanning electron microscopy (SEM). Results: The results showed that the ratio of oxidized corn starch and gelatin was 5:5, the drying weight loss of oxidized corn

starch/gelatin composite capsules was 13.0%~15.0%, the disintegration time in distilled water and simulated artificial gastric juice was less than 10min, and the crunchability was not more than 5 granules. Conclusion: The properties of the composite capsule prepared by blending oxidized corn starch with gelatin met the requirements of Chinese Pharmacopoeia (2020).

Keywords: oxidized corn starch; gelatin; capsules; preparation; characterization

胶囊壳是一种重要的药剂载体,能够掩盖药物气味,延缓药物释放的时间,使得药物在指定区域内再进行释放,提高药效。目前大部分胶囊壳的主要成分为明胶,明胶主要来源于动物的骨骼、皮肤和软骨,具有一些优异性能,如成膜性、气体阻隔性、生物降解性、生物相容性等,被广泛用作空心胶囊的主要原材料^[1]。但是明胶价格昂贵,目前已达到7万~8万元/t,使得明胶胶囊壳的生产成本太高,开发低成本的明胶替代物,部分取代或完全取代明胶,降低胶囊壳的生产成本,已成为更多研究者关注的方向^[2]。

淀粉是一种天然的高分子聚合物,一般由直链淀粉和支链淀粉组成^[3],具有绿色天然、来源广泛、含量丰富、价格低廉等优势^[4],引起了生物基胶囊壳领域的广泛关注。王向峰等^[5]研究了不同取代度的羟丙基淀粉制备淀粉空心胶囊及其性能的影响;何绍凯等^[6]研究了酶解羟丙基马铃薯淀粉的制备及其在空心胶囊壳中的应用;陈启杰等^[7]研究了绿豆淀粉基胶囊壳的制备,通过纤维素纳米晶对绿豆淀粉基膜进行增强,提升胶囊壳的质量。淀粉本身的性质决定淀粉基膜的强度,虽然通过对淀粉改性能提高淀粉基膜的强度,但与明胶基膜比较,其膜强

基金项目: 国家级大学生创新训练计划项目(编号: S202310536039)

作者简介: 谭心,女,长沙理工大学在读本科生。

通信作者: 陈启杰(1980—),男,长沙理工大学教授,博士。

E-mail: chenqijie@126.com

收稿日期: 2024-03-04 **改回日期:** 2024-05-10

度还存在一定的差距。采用淀粉完全取代明胶,制备淀粉基胶囊壳,目前还存在一定的难度,而与明胶共混,由于原淀粉和明胶为两种完全不同的物质,且原淀粉黏度很大,二者之间无法完全共混成均一体系,将原淀粉与明胶进行共混制备成膜,研究发现,膜干燥后二者之间出现了明显的相分离^[8],淀粉/明胶共混制备胶囊壳的性能也较差^[9],为进一步研究淀粉/明胶复配体系,对淀粉进行适当的改性十分必要,对淀粉进行氧化制备氧化淀粉,可以降低淀粉黏度并提高淀粉的成膜性^[10]。

研究拟以玉米淀粉为原料,用过氧化氢对玉米淀粉进行氧化改性后,与明胶进行共混复配,并添加甘油和聚乙二醇作为增塑剂,再分别通过流延法和浸渍法制备氧化玉米淀粉/明胶复合胶囊膜和胶囊壳,研究胶囊壳的相关性能,并采用傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)等对其性能进行表征,为改性淀粉/明胶复配胶囊壳的制备提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

玉米淀粉:食品级,玉峰实业集团有限公司;

过氧化氢:30%,国药集团化学试剂有限公司;

聚乙二醇 600、甘油、十二烷基硫酸钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

明胶:食品级,岳阳天添胶囊股份有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

数显恒温水浴锅:HH-2 型,天津市塞得利斯实验分析仪器制造厂;

数显直流恒速搅拌器:JJ-6 型,金坛市医疗仪器厂;

数显鼓风干燥箱:GZX-9076 MBE 型,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;

真空干燥箱:DZF-6050 型,上海新苗医疗器械制造有限公司;

数字黏度计:DV-II + Pro Brookfield 型,美国 Brookfield 公司;

卧式电脑拉力仪:WZL-300B 型,杭州轻通博科自动化技术有限公司;

崩解时限测定仪:LB-2D 型,上海黄海药检仪器有限公司;

红外光谱仪:Vertex 70v 型,德国 Bruker 公司;

X射线衍射仪:D/MAX 2200 型,日本理学株式会社;

扫描电子显微镜:Quanta FEG250 型,美国 FEI 公司。

1.2 方法

1.2.1 氧化玉米淀粉制备 称取一定量的玉米淀粉,用蒸馏水配成 20% 的淀粉乳液,加入 15% 的过氧化氢(相

对淀粉绝干量),在 45 °C 水浴锅,300 r/min 的条件下搅拌反应 3 h,然后中和,抽滤,用 70% 乙醇溶液洗涤 3 次,40 °C 烘箱干燥 4 h,得到氧化玉米淀粉(OST)。

1.2.2 氧化玉米淀粉/明胶(OST/Ge)复合凝胶溶液制备

氧化玉米淀粉/明胶(OST/Ge)复合凝胶溶液的固含量为 25%,用氧化玉米淀粉与明胶共混,氧化玉米淀粉与明胶的质量比分别为 0:10(纯明胶),1:9,2:8,3:7,4:6,5:5,在复合溶液中加入 3.2% 的聚乙二醇 600,2.5% 的甘油,80 °C 水浴锅,300 r/min 搅拌 30 min 后,加入 0.8% 十二烷基硫酸钠,在 80 °C,700 r/min 搅拌 5 h,直至获得均一稳定的 OST/Ge 复合凝胶溶液,其对应的凝胶溶液和胶囊膜,胶囊壳均分别标记为 OST-0/Ge,OST-1/Ge,OST-2/Ge,OST-3/Ge,OST-4/Ge,OST-5/Ge。

1.2.3 氧化玉米淀粉/明胶(OST/Ge)复合胶囊膜制备

将 OST/Ge 复合凝胶溶液室温静置冷却至 50 °C,然后将凝胶溶液通过流延法倒在直径为 150 mm 的聚丙烯培养皿上,将流延好的胶囊膜转入 30 °C 的真空干燥箱中干燥 2 h,然后在 25 °C、60% RH 的恒温恒湿箱中放置 24 h 后备用。

1.2.4 氧化玉米淀粉/明胶(OST/Ge)复合胶囊壳制备

将 OST/Ge 复合凝胶溶液室温静置冷却至 50 °C,养胶 2 h 后,利用浸渍法将不锈钢蘸胶模具浸入 OST/Ge 复合凝胶溶液中 8 s,蘸胶后在 38 °C 的烘箱中干燥 1 h 后,进行脱壳裁剪,得到 OST/Ge 胶囊壳,保存备用。

1.2.5 黏度的测定 采用 Brookfield 数字黏度计对 OST/Ge 复合凝胶溶液进行黏度测量,测量时 OST/Ge 复合凝胶溶液的温度为 50 °C。

1.2.6 拉伸强度 将平衡水分后的 OST/Ge 复合胶囊膜裁剪成 15 mm×100 mm 的长条,然后在卧式电脑拉力仪上,按照 ASTM 标准方法对其进行拉伸强度(TS)的测定。平行测试 5 次,取其平均值,并按式(1)计算拉伸强度。

$$\sigma = F/A, \quad (1)$$

式中:

σ ——拉伸强度,MPa;

F ——拉力,N;

A ——样品横截面积,m²。

1.2.7 干燥失重 根据《中国药典》(2020)中描述的方法测定 OST/Ge 复合胶囊壳的干燥失重损失。

1.2.8 崩解时限 按照《中国药典》(2020)中描述的方法,分别测量 37 °C 时 OST/Ge 复合胶囊壳在去离子水中和人工模拟胃液中的崩解时限。人工模拟胃液配制:取稀盐酸 16.4 mL,加入约 800 mL 去离子水中,加入 10 g 胃蛋白酶,定容至 1 000 mL。

1.2.9 脆碎度 按照《中国药典》(2020)中描述的方法,将 50 粒胶囊壳样品,置表面皿中,放入盛有硝酸镁饱和

溶液的干燥器内, 25 ℃ 恒温 24 h, 立即分别逐粒放入直立木板(厚度 2 cm)上的玻璃管(内径为 24 mm, 长为 200 mm)内, 将材质为聚四氟乙烯、直径为 22 mm、重(20.0±0.1) g 的圆柱形砝码从玻璃管口处自由落下, 观察胶囊是否破裂, 如有破裂, 破裂数不得超过 5 粒。

1.2.10 FTIR 分析 在钨灯的照射下, 将干燥的 OSt/Ge 复合胶囊壳样品和 KBr(质量比约 1:100)混合研磨成粉末, 通过压片机压成透明薄片, 然后进行红外检测。

1.2.11 XRD 分析 采用 X 射线衍射仪测量 OSt/Ge 复合胶囊壳的 XRD 图谱。2 θ 扫描范围为 5°~50°, 速度为 5(°)/min, 并对数据进行分析。

1.2.12 SEM 分析 采用扫描电子显微镜对 OSt/Ge 复合胶囊壳的表面形貌进行分析。由于薄膜和胶囊壳是由同一种溶液制备而成的, 主要是对胶囊壳进行研究, 因此只选择 SEM 观察胶囊壳的表面微观形貌。将 1 cm×1 cm 的胶囊壳样品表面镀金, 并在加速电压为 10.0 kV 时在扫描电镜中进行观察。

1.3 数据分析

通过 Origin 软件进行数据处理, 每组试验平行 3 次, 结果以平均值表示。

2 结果与分析

2.1 OSt/Ge 复合凝胶溶液的黏度分析

胶囊壳的成壳凝胶溶液的黏度对其成壳过程有较大的影响, 凝胶溶液黏度过大或者过小, 都不利于蘸胶成壳^[11]。表 1 为氧化玉米淀粉和明胶的复合凝胶溶液在 50 ℃, 25% 固含量的黏度变化, 可以看出, 原玉米淀粉在 25% 的固含量下, 溶液非常黏稠, 无法测定其黏度, 通过过氧化氢氧化改性后, OSt 的黏度显著降低, 但还是比明胶的黏度高很多, 这与淀粉和明胶的结构性质有关^[12]。当用氧化玉米淀粉与明胶共混后, 配成 OSt/Ge 复合凝胶溶液, 发现氧化玉米淀粉与明胶的质量比分别为 1:9, 2:8, 3:7, 4:6 时, OSt/Ge 复合凝胶溶液的黏度比纯明胶溶液的还低, 表明氧化玉米淀粉和明胶有较好的协同效应, 两者混合后, 明胶中的氨基会与氧化淀粉中的羰基产生席夫碱反应, 同时增大了淀粉分子的距离, 能够加速分子的流动性, 使复合溶液黏度降低, 但当氧化玉米淀粉与明胶质量比达到 5:5 时, 由于氧化玉米淀粉本身的黏度高, 使得 OSt/Ge 复合凝胶溶液黏度迅速增加, 达到 1 240 mPa·s, 但该黏度溶液仍然在胶囊壳蘸胶黏度范围内, 可以正常蘸胶成壳。当氧化玉米淀粉与明胶质量比为 6:4 时, OSt/Ge 复合凝胶溶液黏度高达 12 000 mPa·s, 溶液太稠, 无法正常蘸胶成壳, 故试验讨论的氧化玉米淀粉/明胶复合胶囊壳部分, 氧化玉米淀粉与明胶的质量比最高设为 5:5, 即氧化玉米淀粉取代明胶不超过 50%。

表 1 OSt/Ge 复合凝胶溶液的黏度变化[†]

Table 1 Viscosity change of OSt/Ge composite gel solution

凝胶溶液	黏度/(mPa·s)	凝胶溶液	黏度/(mPa·s)
OSt-0/Ge	1 060	OSt-4/Ge	840
OSt-1/Ge	670	OSt-5/Ge	1 240
OSt-2/Ge	692	纯 OSt	4 450
OSt-3/Ge	728	原玉米淀粉	太稠

[†] 黏度测定条件: 溶液固含量 25%, 温度 50 ℃。

2.2 OSt/Ge 复合胶囊膜的拉伸强度和断裂伸长率

胶囊膜的拉伸强度和断裂伸长率在一定程度上也反映胶囊壳的力学性能^[13]。从图 1 可以看出, 纯明胶膜具有较好的拉伸强度, 为 23.6 MPa, 断裂伸长率为 3.01%, 而纯氧化淀粉膜的强度较低, 拉伸强度和断裂伸长率分别仅为 8.3 MPa 和 0.33%, 氧化淀粉和明胶共混后的复合胶囊膜的拉伸强度和断裂伸长率相对纯明胶膜有所下降, 随着氧化玉米淀粉比例的不断增加, 复合膜的强度也逐渐降低, 这是因为氧化玉米淀粉的加入破坏了明胶膜的连续结构, 氧化淀粉与明胶之间的结合力小于明胶连续相带来的拉力, 所以复合膜的拉伸强度和断裂伸长率降低。当氧化淀粉与明胶质量比为 5:5, OSt-5/Ge 复合胶囊膜的拉伸强度和断裂伸长率为 15.4 MPa 和 1.25%, 远大于纯 OSt 膜(8.3 MPa 和 0.33%), 在胶囊壳强度方面起到积极作用。

2.3 OSt/Ge 复合胶囊壳的干燥失重

胶囊壳的干燥失重对胶囊壳的使用、保存有一定的影响, 干燥失重太低会导致胶囊壳易脆开裂, 干燥失重太高则影响胶囊壳的使用, 降低保质期限^[14]。参考《中国

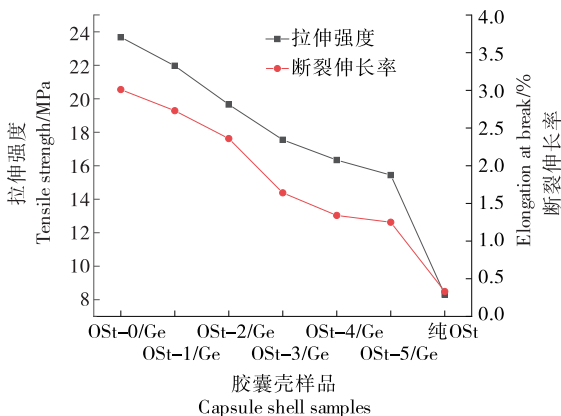


图 1 OSt 比例对 OSt/Ge 复合胶囊膜拉伸强度和断裂伸长率的影响

Figure 1 Effects of different OSt ratio on tensile strength and elongation at break of OSt/Ge composite capsule film

药典》(2020)的规定,胶囊壳的干燥失重率范围应为12.5%~17.5%。表2为OSt不同比例对OSt/Ge复合胶囊壳的干燥失重,可以看出,纯明胶胶囊壳具有较好的保水性,其干燥失重略高,随着氧化玉米淀粉比例不断增大,复合胶囊壳的保水性略有降低,其干燥失重略有下降,但均保持在13.0%~15.0%,符合《中国药典》(2020)要求。表明氧化玉米淀粉与明胶复配后,添加的甘油和聚乙二醇中存在大量亲水的羟基官能团,在一定程度上弥补了氧化淀粉的保水性,能制备出干燥失重满足要求的玉米氧化淀粉/明胶复合胶囊壳。

表2 OSt比例对OSt/Ge复合胶囊壳干燥失重的影响

Table 2 Effects of different OSt ratio on the drying weight loss of OSt/Ge composite capsule

凝胶溶液	干燥失重/%	凝胶溶液	干燥失重/%
OSt-0/Ge	14.71	OSt-4/Ge	13.37
OSt-1/Ge	14.23	OSt-5/Ge	13.28
OSt-2/Ge	13.87	纯 OSt	未能成壳
OSt-3/Ge	13.58		

2.4 OSt/Ge 复合胶囊壳的崩解时限

胶囊壳的崩解时限直接影响胶囊壳内药物载体释放的时机和人体的健康,表3为OSt/Ge复合胶囊壳在蒸馏水中和人工模拟胃液中的崩解时限。由表3可以看出,复合胶囊壳在人工模拟胃液中的崩解时限均比在蒸馏水中的更快一些。随着氧化玉米淀粉比例的增加,OSt/Ge复合胶囊壳在蒸馏水中的崩解时间略有延长,当氧化玉米淀粉与明胶质量比为5:5时,OSt-5/Ge复合胶囊壳的崩解时间比纯明胶延长了46 s,但在模拟人工胃液中,随着氧化玉米淀粉含量的增加,复合胶囊壳的崩解时间逐渐降低,OSt-5/Ge复合胶囊壳在模拟人工胃液中的崩解时间比纯明胶缩短了80 s,表明氧化玉米淀粉在蒸馏水的崩解阻力比明胶大,但在模拟人工胃液中,其崩解阻力比明胶小很多,加速了胶囊壳的崩解,表中数据表明,OSt/Ge复合胶囊壳的崩解时限均满足《中国药典》

表3 OSt/Ge 复合胶囊壳的崩解时限

Table 3 Disintegration time of OSt/Ge composite capsule

胶囊壳	完全崩解时间/s	
	在蒸馏水中	在模拟人工胃液中
OSt-0/Ge	251	191
OSt-1/Ge	263	171
OSt-2/Ge	277	162
OSt-3/Ge	284	122
OSt-4/Ge	292	111
OSt-5/Ge	297	101

(2020)要求(10 min内全部崩解)。

2.5 OSt/Ge 复合胶囊壳的脆碎度

如表4所示,明胶胶囊壳脆碎度很好,当OSt与明胶共混的比例不超过2份时,OSt/Ge复合胶囊壳的脆碎度均为0,表明少量氧化玉米淀粉与明胶共混,对胶囊壳的脆碎度没有影响,但当氧化玉米淀粉比例逐渐增大,胶囊壳的脆碎度逐渐增大,当其于明胶质量比为5:5时,OSt-5/Ge复合胶囊壳的脆碎度上升到4粒,但仍满足《中国药典》(2020)的要求(不超过5粒),氧化玉米淀粉的强度和柔韧性均比明胶差,与明胶共混后,复合胶囊壳的脆碎度增加,当氧化玉米淀粉与明胶质量比为5:5时,脆碎度已临近边缘,但仍满足要求,有效降低了胶囊壳的生产成本。

表4 OSt比例对OSt/Ge复合胶囊壳脆碎度的影响

Table 4 Effects of different OSt ratio on shell brittleness of OSt/Ge composite capsules

胶囊壳	脆碎度/粒	胶囊壳	脆碎度/粒
OSt-0/Ge	0	OSt-3/Ge	2
OSt-1/Ge	0	OSt-4/Ge	2
OSt-2/Ge	0	OSt-5/Ge	4

2.6 FTIR 分析

从图2可以看出,1751 cm⁻¹归属于C=O键的拉伸振动,表明氧化淀粉中羰基的存在,淀粉被成功氧化^[15]。氧化玉米淀粉相对玉米原淀粉,在3430 cm⁻¹处的宽峰明显减弱,该峰与O—H的拉伸振动有关,在淀粉被氧化后,淀粉分子中的羟基转变为羰基,因此O—H峰强度明显减弱,但在OSt/Ge复合胶囊壳的对应峰又显著增强,表明氧化淀粉与明胶混合后,羟基峰强度又显著增强。2938 cm⁻¹对应于葡萄糖环C—H的拉伸振动,其强度变化与O—H键的变化一致,淀粉被过氧化氢氧化后减弱,OSt与明胶混合后又有所增强^[16]。1630 cm⁻¹处与C=N键的拉伸振动有关,对比纯明胶,可以看到OSt/Ge

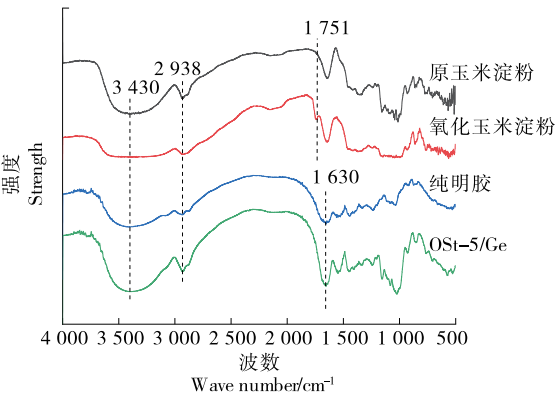


图2 OSt/Ge 复合胶囊壳的 FTIR 图

Figure 2 FTIR of OSt/Ge composite capsule

复合胶囊壳在此处的峰强度明显增强,表明氧化淀粉和明胶之间形成了新的键,氧化淀粉中的羧基或羰基可以与蛋白质的氨基交联,形成席夫碱亚胺基($C=N$),同时 OSt/Ge 复合胶囊壳在 $1\ 751\ \text{cm}^{-1}$ 处 $C=O$ 拉伸振动峰的消失也证明这一点^[17]。

2.7 XRD 分析

从图 3 可以看出,玉米原淀粉和氧化玉米淀粉在 2θ 为 15.0° , 22.8° 处均有明显的衍射峰,在 2θ 为 17.1° , 18.2° 处有相邻的两个尖峰,是典型的 A 型结构,表明过氧化氢氧化并未改变淀粉的晶型结构^[18]。对于纯明胶膜,在 2θ 为 7° 时有一个较强的衍射峰,归因于明胶的结晶三螺旋结构,但氧化玉米淀粉和明胶复合胶囊壳曲线中,该峰的强度大幅减弱,表明其结晶三螺旋结构被破坏,可能与明胶中的胺基与氧化淀粉中的羰基发生的席夫碱反应有关。相较于淀粉和明胶, OSt-5/Ge 复合胶囊壳的淀粉和明胶的结晶特征消失,表明二者之间相容性较好,无明显的相分离情况,也证明了二者之间存在键合反应。

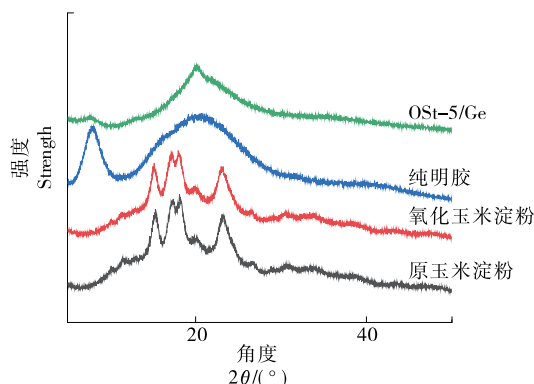


图 3 OSt/Ge 复合胶囊壳的 XRD 图

Figure 3 XRD pattern of OSt/Ge composite capsule

2.8 SEM 分析

从图 4 可以看出, OSt-0/Ge(纯明胶壳)表面光滑无杂质,比较平整,用氧化玉米淀粉与明胶共混后的 OSt/Ge 复合胶囊壳整体上表面平整光滑,结构紧凑,表明明胶和氧化玉米淀粉共混复合后相容性较好,形成均一的连续相,然而,当氧化玉米淀粉含量过高时,膜表面出现不同程度的突起,由于淀粉和明胶在干燥过程中的收缩率不同导致,但在外观形貌上无明显瑕疵,当氧化玉米淀粉与明胶质量比为 5:5 时,复合凝胶成膜性外观仍满足要求。

3 结论

通过氧化玉米淀粉与明胶共混,以甘油和聚乙二醇为增塑剂,制备氧化玉米淀粉/明胶复合胶囊壳,当氧化玉米淀粉与明胶质量比为 5:5 时,制备的 OSt-5/Ge 复合胶囊壳的干燥失重保持在 $13.0\%\sim 15.0\%$,在蒸馏水和模拟人工胃液中的崩解时限在 10 min 以内,脆碎度不超

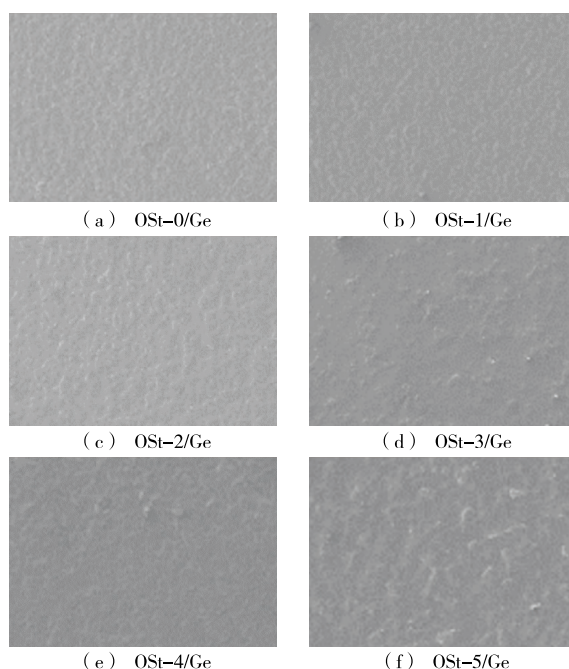


图 4 OSt/Ge 复合胶囊壳表面的 SEM 图

Figure 4 SEM image of OSt/Ge composite capsule

过 5 粒,均符合《中国药典》(2020)要求。氧化玉米淀粉与明胶共混制备的复合胶囊壳显著降低了明胶基胶囊壳的成本。后续将在全淀粉基胶囊壳的制备以及产品性能的测试评估上深入研究,开发全淀粉基胶囊壳。

参考文献

- [1] 郭华, 史泽毅, 张海霞, 等. 明胶-柠檬酸-硬脂酸复合凝胶的制备及性能[J]. 现代食品科技, 2021, 37(10): 171-179, 307.
GUO H, SHI Z Y, ZHANG H X, et al. Preparation and properties of gelatin-citric acid-stearic acid composite gel [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(10): 171-179, 307.
- [2] 潘博, 贾雪, 支朝晖, 等. 复合改性淀粉膜材料工艺优化与性能分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(9): 156-163.
PAN B, JIA X, ZHI Z H, et al. Process optimization and performance analysis of composite modified starch membrane materials[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(9): 156-163.
- [3] AHMED M A, AL-KAHTANI H A, JASWIR I, et al. Extraction and characterization of gelatin from camel skin (potential halal gelatin) and production of gelatin nanoparticles [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2020, 27(6): 1 596-1 601.
- [4] LI Y, WANG J H, WANG E C, et al. The microstructure and thermal properties of pulsed electric field pretreated oxidized starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 235: 123721.
- [5] 王向峰, 章家伟, 帅放文, 等. 羟丙基淀粉取代度对淀粉空心胶囊性能的影响[J]. 中国新药杂志, 2017, 26(24): 2 984-2 988.

- WANG X F, ZHANG J W, SHUAI F W, et al. The effect of hydroxypropyl starch substitution degree on the performance of starch hollow capsules[J]. Chinese Journal of New Drugs, 2017, 26(24): 2 984-2 988.
- [6] 何绍凯, 刘文娟, 曹余, 等. 酶解羟丙基马铃薯淀粉的制备及其在空心胶囊中的应用[J]. 食品工业科技, 2017, 38(6): 163-167.
- HE S K, LIU W J, CAO J, et al. Preparation of enzymatic hydrolyzed hydroxypropyl potato starch and the application in hollow capsules[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(6): 163-167.
- [7] 陈启杰, 赵雅兰, 踪张扬, 等. 绿豆淀粉/纤维素纳米晶胶囊壳的制备及表征[J]. 中国食品学报, 2022, 22(8): 182-189.
- CHEN Q J, ZHAO Y L, ZONG Z Y, et al. Preparation and characterization of mung bean starch/cellulose nanocrystalline capsule shells[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(8): 182-189.
- [8] MORENO O, CÁRDENAS J, ATARÉS L, et al. Influence of starch oxidation on the functionality of starch-gelatin based active films[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 178: 147-158.
- [9] ZHANG N Z, LIU H S, YU L, et al. Developing gelatin-starch blends for use as capsule materials[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92(1): 455-461.
- [10] 宿玲恰, 吴敬. 淀粉基未来食品及其制备方法研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(12): 5-16.
- SU L Q, WU J. Research progress on starch based future foods and their preparation methods[J]. Journal of Food and Biotechnology, 2021, 40(12): 5-16.
- [11] ZHANG Y P, ZHAO Q, WANG H S, et al. Preparation of green and gelatin-free nanocrystalline cellulose capsules[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 164: 358-363.
- [12] 黄峻榕, 唐晓东, 蒲华寅. 淀粉凝胶的微观结构、质构及稳定性研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2017, 36(7): 673-679.
- HUANG J R, TANG X D, PU H Y. Research progress on microstructure, texture and stability of starch gel[J]. Journal of Food and Biotechnology, 2017, 36(7): 673-679.
- [13] MARIIA K, ARIF M, DING Y, et al. Preparation of novel hard capsule using water-soluble polysaccharides and cellulose nanocrystals for drug delivery [J]. Journal of Pharmaceutical Innovation, 2022, 18(2): 675-686.
- [14] PUTRO J N, SOETAREDJO F E, LUNARDI V B, et al. Polysaccharides gums in drug delivery systems: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127020.
- [15] SCOPEL B S, RIBEIRO M E, DETTMER A, et al. Cornstarch-gelatin films: Commercial gelatin versus chromed leather waste gelatin and evaluation of drying conditions[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2017, 26(5): 1 998-2 006.
- [16] DANG X G, SHAN Z H, CHEN H. The preparation and applications of one biodegradable liquid film mulching by oxidized corn starch-gelatin composite[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2016, 180(5): 917-929.
- [17] ZHANG Y H, YANG N, ZHANG Y Q, et al. Effects of κ -carrageenan on pullulan's rheological and texture properties as well as pullulan hard capsule performances [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 238: 116190.
- [18] GARCIA M A V T, GARCIA C F, FARACO A A G. Pharmaceutical and biomedical applications of native and modified starch: A review[J]. Starch, 2020, 72(7/8): 1900270.
-
- (上接第 80 页)
- [11] 陈龙, 王谊, 程昊, 等. 水相高温处理对淀粉结构与性质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(11): 1-11.
- CHEN L, WANG Y, CHENG H, et al. Effect of high temperature treatments of aqueous phase on structure and properties of starch[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(11): 1-11.
- [12] 李少斌, 方婷, 苏煌杰, 等. 过热蒸汽干燥技术研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 219-226.
- LIS B, FANG T, SU H J, et al. Research progress of superheated steam drying technology[J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 219-226.
- [13] KATHURIA D, DHIMAN A K, ATTRI S. Sous vide, a culinary technique for improving quality of food products: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 119: 57-68.
- [14] 张楠, 葛鑫会, 石琳, 等. 小麦胚芽的过热蒸汽稳定化工艺研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 129-132, 158.
- ZHANG N, GE X H, SHI L, et al. Study on the process of superheated steam stabilization of wheat germs [J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 129-132, 158.
- [15] 王学成, 张绪坤, 苏志伟, 等. 过热蒸汽干燥及逆转点研究进展[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 234-237.
- WANG X C, ZHANG X K, SU Z W, et al. Research advances on superheated steam drying and inversion point [J]. Food & Machinery, 2014, 30(2): 234-237.
- [16] 宋展鹏, 曹卫平, 葛连富, 等. T 型槽加载扼流器设计[J]. 无线电工程, 2019, 49(9): 825-828.
- SONG Z P, CAO W P, GE L F, et al. Design on T-groove loaded choke[J]. Radio Engineering, 2019, 49(5): 825-828.
- [17] 李剑, 王伯燕, 陆伟, 等. 基于酥饼和面包片的电烤箱烘焙均匀性测试研究[J]. 中国标准化, 2021(19): 241-245.
- LI J, WANG B Y, LU W, et al. Research on baking uniformity test of electric oven based on shortbread and slices of bread[J]. China Standardization, 2021(19): 241-245.
- [18] 夏然, 唐相伟, 栾春, 等. 平板微波炉食物加热均匀性提升研究[J]. 真空电子技术, 2016(4): 51-55.
- XIA R, TANG X W, LUAN C, et al. Food heating uniformity improvement of flat-panel microwave ovens [J]. Vacuum Electronics, 2016(4): 51-55.