

中图分类号: R94 文献标志码: A 文章编号: 1006-4931(2025)04-0048-06
doi:10.3969/j.issn.1006-4931.2025.04.012



马铃薯淀粉微球的制备、结构表征及性能研究*

江德恩^{1,2,3}, 武苏莹^{1,2,3}, 吴明慧^{1,2,3}, 尼玛次仁⁴, 谢和兵^{1,2,3,4,△}

(1. 安徽中医药大学药学院, 安徽 合肥 230013; 2. 江苏省南通市海门长三角药物高等研究院, 江苏 南通 226133;
3. 江苏神猴医药研究有限公司, 江苏 南通 226133; 4. 西藏神猴药业有限责任公司, 西藏 日喀则 857000)

摘要:目的 制备马铃薯淀粉微球(PSM), 表征其结构, 并研究其性能。方法 以可溶性马铃薯淀粉(SPS)为原料、三偏磷酸钠(TSTP)为交联剂、聚乙二醇(PEG)20000为连续相, 采用水包水乳液法, 经乳化、温育、后处理制备 PSM。采用激光粒度分析仪、傅里叶变换红外光谱仪、扫描电镜、X-射线衍射仪分别表征 PSM 的粒径、化学组成、表面形貌、晶体结构, 并通过吸水试验、热重分析仪、体外消化试验研究 PSM 的吸水性能、热稳定性和消化性能。结果 PSM 粒径分布较分散, 平均 53.60 μm , 大于 SPS 的 33.30 μm ; PSM 化学组成与 SPS 比较变化不明显; 表面形貌由 SPS 的椭圆形、球形转变为球形聚集状态, 表面稍粗糙, 且有孔隙和凹陷结构; 晶体结构由 SPS 的 B 型转变为无定形; 平均吸水倍率为 921.50%, 完全吸水时间为 23.87 s, 分别较 SPS 高 411.94%, 长 219.12%; 热分解温度范围 284.85~325.30 $^{\circ}\text{C}$, 热失重率 63.45%, 热稳定性较 SPS 有降低趋势(但不明显); 淀粉水解率 35.59%, 较 SPS 低 34.25%。结论 与 SPS 相比, 水包水乳液法制备的 PSM, 其粒径、表面形貌、晶体结构、吸水性能、消化性能发生较明显变化, 而化学组成和热特性无明显变化。

关键词: 马铃薯; 淀粉微球; 水包水乳液; 制备; 结构表征; 性能

Preparation, Structural Characterization and Property Study of Potato Starch Microspheres

JIANG Deen^{1,2,3}, WU Suying^{1,2,3}, WU Minghui^{1,2,3}, NIMA Ciren⁴, XIE Hebing^{1,2,3,4}

(1. Anhui University of Traditional Chinese Medicine, Hefei, Anhui, China 230013; 2. Yangtze Delta Drug Advanced Research Institute, Nantong, Jiangsu, China 226133; 3. Jiangsu God Mokey Medical Research Co., Ltd., Nantong, Jiangsu, China 226133; 4. Tibet God Mokey Pharmaceutical Co., Ltd., Rikaze, Xizang, China 857000)

Abstract: Objective To prepare potato starch microspheres (PSM), and to study their structural characterization and properties. **Methods** PSM was prepared by the water-in-water emulsion method through emulsification, incubation and post-treatment, with soluble potato starch (SPS) as raw material, trisodium trimetaphosphate (TSTP) as cross-linking agent, polyethylene glycol (PEG) as continuous phase. The particle size, chemical composition, apparent morphology, and crystal structure of PSM were characterized by the laser particle size analyzer, Fourier transform infrared spectrometer, scanning electron microscope, and X-ray diffractometer, respectively; and the water absorption property, thermal stability and digestion property of PSM were studied by the water absorption test, thermogravimetric analyzer, and *in vitro* digestion test. **Results** The particle size distribution of PSM was relatively dispersed, with an average of 53.60 μm , which was larger than the 33.30 μm of SPS; the chemical composition of PSM showed no significant changes compared to SPS; the apparent morphology of PSM showed a spherical aggregation, with a slightly rough surface and porous and concave structures on the surface, which were different from the elliptical and spherical shapes of SPS; PSM had an amorphous crystal structure, which was different from the B-type structure of PSM; the average water absorption rate of PSM was 921.50%, and the complete water absorption time was 23.87 s, which was 411.94% higher and 219.12% longer than that of SPS, respectively; the thermal decomposition temperature of PSM was in the range of 284.85 to 325.30 $^{\circ}\text{C}$, with a

*基金项目: 西藏自治区科技计划项目[XZ202301ZY0005G]。

第一作者: 江德恩, 女, 在读硕士研究生, 研究方向为药剂学, (电子信箱)jde201246@163.com。

△通信作者: 谢和兵, 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为新型药用辅料与药物制剂技术, (电子信箱)76445044@qq.com。

- pathway[J]. Mol Cell Biochem, 2021, 476(6): 2409-2420.
- [26] TENG GY, WANG YJ, GENG M, et al. LncRNA MEG3 inhibits the growth, invasion and migration of Wilms' tumor via Wnt/ β -catenin pathway[J]. Eur Rev Med Pharmacol Sci, 2020, 24(19): 9899-9907.
- [27] ZHAO W, LI J, LI P, et al. Wilms tumor-suppressing peptide inhibits proliferation and induces apoptosis of Wilms tumor cells in vitro and in vivo[J]. J Cancer Res Clin Oncol, 2019, 145(10): 2457-2468.
- [28] 田芝瑜, 李燕娇, 刘济豪, 等. 青蒿琥酯对人结肠癌细胞中 Wnt/ β -catenin 信号通路的影响[J]. 中国老年学杂志, 2019, 39(1): 151-154.
- [29] 丁娜, 贺红林, 袁怡君, 等. 青蒿琥酯通过调节卵巢癌细胞中 Wnt/ β -catenin 信号通路诱导铁死亡[J]. 现代妇产科进展, 2023, 32(7): 504-509.

(收稿日期: 2023-12-14; 修回日期: 2024-12-07)

thermal weight loss rate of 63.45%, the thermal stability showed a decreasing trend compared to SPS (but not significantly); the starch hydrolysis rate of PSM was 35.59%, which was 34.25% lower than that of SPS. **Conclusion** Compared with SPS, the PSM prepared by water-in-water emulsion method has obvious changes in particle size, apparent morphology, crystal structure, water absorption and digestion properties, but no obvious changes in chemical composition and thermal characteristics.

Key words: potato; starch microspheres; water-in-water emulsion; preparation; structural characterization; property

淀粉微球是在引发剂的作用下,淀粉上的羟基与交联剂发生交联反应形成的人造衍生物^[1],广泛应用于医药、医疗器械、环保及食品加工等领域^[2-5]。因其生物相容性高、可降解、呈多孔结构、比表面积大,且含大量羟基活性基团,在新型止血材料领域具有较大潜力^[6-8],是改性淀粉在医疗器械领域最具价值的应用。其主要制备方法有物理法、化学沉淀法、酶解法和乳液法等^[9-11]。其中反相乳液法是目前制备淀粉微球的常用方法^[12-14],该方法以糊化淀粉溶液为水相、食用油为油相,乳化形成油包水(W/O)型乳液,再加入环氧氯丙烷、戊二醛等化学交联剂,最后用甲苯、氯仿、无水乙醇等洗涤。然而,废水、废油的处理以及有机溶剂的残留风险限制了其在食品、药品、医疗器械等领域的工业生产及应用推广。

水包水(W/W)乳液法基于高聚物-高聚物不相容原理制备淀粉微球,制备过程中选择无毒的水溶性高分子溶液代替了W/O乳液中的油相,有效避免了有机溶剂残留^[15]。目前国内外关于该制备工艺的报道较少^[16-19],且多集中于制备工艺的优化及制备条件对制备结果影响的研究,未见对以此法制得微球的表征分析和性能研究。本研究中采用W/W乳液法制备马铃薯淀粉微球(PSM),并对其粒径、化学组成、表观形貌、晶体结构进行表征,并对其吸水性能、热稳定和消化性能进行探讨,以为淀粉微球的制备及其在医药、医疗器械及功能食品领域的应用提供参考。现报道如下。

1 仪器、试药与方法

1.1 仪器

JJ-1A型恒速电动搅拌器、TGL-16B型高速离心机(常州中捷实验仪器制造有限公司);DFZ-6050型真空干燥箱、SHZ-A型水浴恒温振荡器(上海精其仪器有限公司);HH-6型数显恒温水浴锅(上海力辰邦西仪器科技有限公司);Synergy-UV型纯水仪(美国Merck Millipore公司);Nicolet iS50型傅立叶变换红外光谱仪、Phenom Pharos G2型扫描电镜(美国Thermo Fisher Scientific公司);D8 Advance型X-射线衍射仪(布鲁克<北京>科技有限公司);UV-1900型紫外-可见分光光度计(日本Shimadzu公司);Topsizer型激光粒度分析仪(珠海欧美克仪器有限公司);SCF-126B

型循环进样系统(珠海欧美克仪器有限公司);TGA 8000型热重分析仪(珀金埃尔默仪器<上海>有限公司)。

1.2 试药

可溶性马铃薯淀粉(SPS,湖南省湘潭市湘潭县淀粉制品有限公司,批号为20230821);聚乙二醇20000(PEG 20000,上海阿拉丁生化科技股份有限公司,批号为F2308417);3,5-二硝基水杨酸(DNS,广州市粤基盖华生物科技有限公司,批号为17335842);猪胰 α -淀粉酶(批号为20230327001,比活性53.3 U/mg),淀粉葡萄糖苷酶(批号为20230105001,比活性128.6 U/mg),均购自上海颖心实验室设备有限公司;其余试剂均为分析纯,水为纯化水。

1.3 方法

1.3.1 PSM制备

使用W/W乳液法^[20],具体步骤如下。1)乳化。将25 mL SPS-三偏磷酸钠(TSTP)-NaOH-H₂O(8:2:1:50, m/m/m/m,初始分散相)缓慢加入含100 mL PEG 20000溶液(35%, m/m,初始连续相)的圆底烧瓶中,30℃水浴下500 r/min持续机械搅拌6 min,制备W/W乳液。2)温育。将圆底烧瓶置30℃下静置温育3 h,使分散相利用交联作用固化成球。3)后处理。将W/W乳液倒入离心管中,5 000 r/min离心5 min,取下层固体,先使用纯化水洗涤3次,再用无水乙醇洗涤3次,洗涤后的微球置真空干燥箱中,60℃干燥12 h,干燥后的微球过100目筛,于干燥器中密封保存,备用。

1.3.2 结果表征

粒径分布:采用激光粒度分析仪和循环进样系统湿法测定样品粒径。以无水乙醇作为分散介质,介质折射率为1.395,搅拌速率为2 500 r/min,扣除蓝光背景后,少量多次将样品加入循环池,使遮光率达10%~20%,测量样品粒径体积分布曲线,重复测3次。

化学组成:使用傅里叶变换红外光谱仪进行分析。称取样品1 mg和干燥的溴化钾100 mg,置玛瑙研钵中研磨均匀并压片,以薄片置红外光谱仪,在4 000~400 cm⁻¹波数范围内进行扫描,绘制红外吸收谱图。

表观形貌:采用扫描电镜观察样品的表观形貌,使用双面碳胶将样品固定于样品台,加速电压为5 kV,在

不同倍数下观察样品表面颗粒形态,采集图像。

晶体结构:采用X-射线衍射仪进行分析。取样品适量,填入样品板凹槽,铺平压实后放于样品台中,在 $3\sim 50^\circ(2\theta)$ 范围内进行叠扫,特征射线为铜靶 $K\alpha$ 辐射($CuK\alpha$),管压40 kV,管流40 mA,扫描速率 $12^\circ/\text{min}$ 。

1.3.3 性能研究

吸水性能^[21]:1)吸水倍率。取样品0.2 g,置培养皿(干燥质量为 m_1)中,缓慢滴加纯化水至样品不再吸水为止,倾斜培养皿1 min,用滤纸吸去多余的水分后称取总质量(m_2),计算样品的吸水倍率,吸水倍率 $= (m_2 - m_1 + 0.2) / 0.2 \times 100\%$ 。重复测定3次,取平均值。2)吸水速率。取样品0.1 g,置 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 滤纸上,平铺均匀,置饱和吸水的海绵,立即按下秒表,至样品粉末全部吸水停止计时,计算用时,重复测定3次,取平均值。

热力学性能:使用热重分析仪进行热重分析。取样品约5 mg,以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率从 30°C 加热至 400°C ,以三氧化二铝空坩埚作参比,载气为氮气,流速为 $20\text{ mL}/\text{min}$ 。

体外消化性能:1)线性关系考察。称取干燥至恒重的葡萄糖100 mg,用水溶解并定容至100 mL,得葡萄糖对照品溶液,分别移取0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 mL,置25 mL具塞刻度试管中,加水定容至2 mL,分别加入DNS试剂加2 mL,混匀,置沸水浴5 min,以流水冷却,加水定容,在540 nm波长处测定吸光度,以葡萄糖质量浓度($X, \text{mg}/\text{L}$)为横坐标、吸光度(Y)为纵坐标进行线性回归。2)测定方法^[22-23]。取样品0.5 g,精密称定,置锥形瓶中,加入10 mL水, 95°C 水浴10 min,水浴冷却至室温,加醋酸钠缓冲溶液($\text{pH } 5.2, 0.2\text{ mol}/\text{L}$)20 mL,混匀,于 37°C 水浴锅中平衡10 min,加入猪胰 α -淀粉酶($100\text{ U}/\text{mL}$)和淀粉葡萄糖苷酶($40\text{ U}/\text{mL}$)的混合酶液10 mL,置 37°C 下恒温水浴振荡(转速 $170\text{ r}/\text{min}$)。模拟消化0, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180 min,取酶解液1 mL,加入无水乙醇4 mL, $4\,000\text{ r}/\text{min}$ 离心5 min,取上清液1 mL,采用3,5-二硝基水杨酸法(DNS法)测定葡萄糖含量。淀粉水解率 $(\%) = 0.9 \times G_p / S_i \times 100$ [G_p 为产生葡萄糖量(mg), S_i 为初始淀粉量(mg)]。

2 结果

2.1 结构表征

粒径分布:结果见图1。可见SPS及PSM的粒径分布较均匀,且均呈正态分布。SPS的粒径多小于 $46.80\text{ }\mu\text{m}$,平均粒径为 $33.30\text{ }\mu\text{m}$;PSM的粒径分布较分散,且粒径比SPS大,平均 $53.60\text{ }\mu\text{m}$,75%以上小于 $90\text{ }\mu\text{m}$,较符合《可吸收止血微球》的团体标准^[21]。

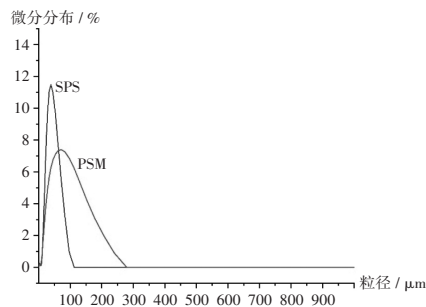


图1 粒径分布图

Fig. 1 Map of particle size distribution

化学组成:结果见图2。SPS在 $3\,750\sim 3\,000\text{ cm}^{-1}$ 出现强而宽的吸收峰,此处是淀粉分子中羟基伸缩振动和羟基氢键缔合后的特征吸收峰,在 $2\,930, 1\,650, 1\,100\text{ cm}^{-1}$ 波数附近出现的峰分别为 $-\text{CH}_2$ 的不对称伸缩振动吸收峰、淀粉中醛基或羰基的伸缩振动吸收峰、 $\text{C}-\text{O}$ 的伸缩振动吸收峰。SPS和PSM的红外光谱图除少许峰的强弱存在差异外基本相同,说明两者化学组成基本相同。另外,在 $1\,500\sim 750\text{ cm}^{-1}$ 未观察到PEG 20000的特征峰,说明本研究中制备的淀粉微球中不含连续相PEG 20000。

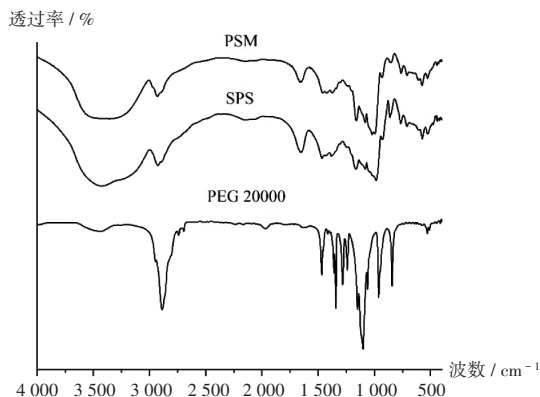


图2 红外光谱图

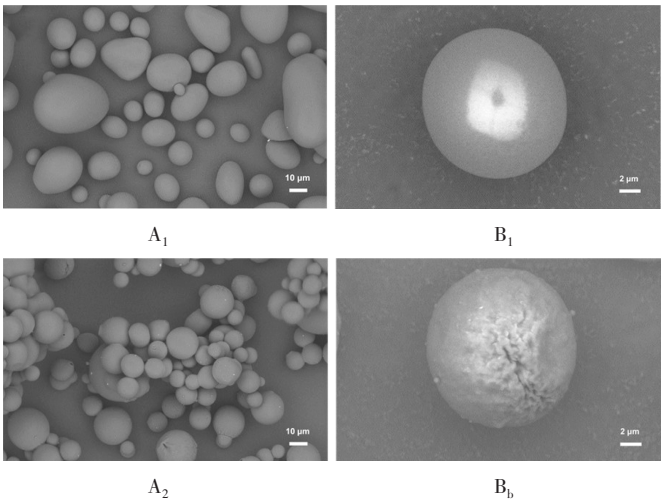
Fig. 2 Infrared spectrograms

表观形貌:结果见图3。SPS颗粒多为椭球形、球形,且淀粉颗粒完整,表面光滑无空隙;PSM呈聚集状态,表面稍粗糙,且有孔隙和凹痕。

晶体结构:淀粉的晶体结构主要来源于淀粉侧链积累形成的双螺旋,可分为A型、B型和C型。由图4可知,SPS在 2θ 为 $5.9^\circ, 17.1^\circ, 22.1^\circ, 23.7^\circ$ 附近存在4个明显衍射峰(典型的B型晶结构),表明SPS仍基本保留了马铃薯原淀粉的结晶区;PSM的谱图上出现1个宽阔的“馒头峰”,未观测到明显的尖峰衍射特征,说明将SPS制备成PSM后,晶形结构由B型转变成为定形。

2.2 性能研究

吸水性能:PSM吸水倍率为921.50%,较SPS的180.00%高411.94%;PSM完全吸水时间为23.87 s,较



A₁. SPS(×2 850) A₂. SPS(×17 000) B₁. PSM(×2 850)
B₂. PSM(×17 000)

图3 扫描电镜图

A₁. SPS(×2 850) A₂. SPS(×17 000) B₁. PSM(×2 850)
B₂. PSM(×17 000)

Fig. 3 SEM images

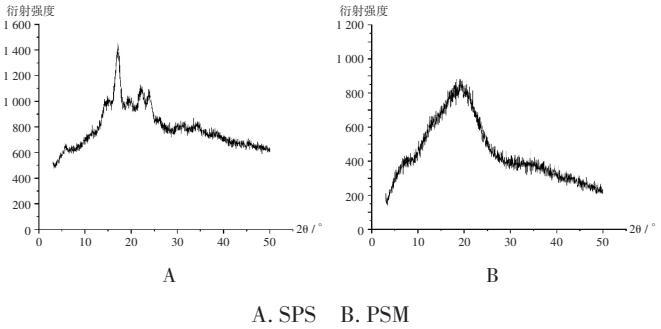


图4 X - 射线衍射图

A. SPS B. PSM

Fig. 4 X - ray diffraction pattern

SPS的7.48 s长219.12%。可见,SPS吸水速率相对较快,但吸水倍率相对欠佳。两者完全吸水时间均短于30 s,符合可吸收止血微球吸水性能标准^[21]。可见,PSM有较强的吸水溶胀能力,与液体接触后可在短时间内吸收大量液体,有利于迅速吸收血液中的水分,以达到凝血目的,在药物载体及新型止血材料领域拥有巨大的应用潜力。

热重:如图5所示,SPS与PSM的热分解均有2个相似的阶段。第1个失重阶段在100℃附近,该阶段是由于样品表面的游离水受热蒸发导致的重量损失,PSM在此阶段对应的特征峰强度更大,表明其吸水溶胀能力更强^[24]。第2个失重阶段在285℃附近,该阶段是由于样品的热分解导致的重量损失,SPS的热分解温度范围为289.61~331.30℃,热失重率为68.10%,PSM的热分解温度范围为284.85~325.30℃,热失重率为63.45%。在前两段失重特征峰之间,SPS的失重曲线相

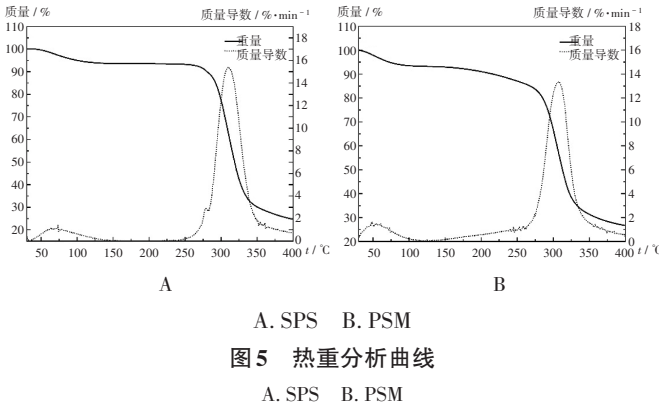


Fig. 5 Thermogravimetric analysis curve

较于PSM更为平缓,说明PSM的热稳定性有降低的趋势,但不明显。

体外消化特性:建立回归方程 $Y = 0.0147X - 0.036$ ($R^2 = 0.9993, n = 6$)。结果显示,葡萄糖质量浓度在8~48 mg / L范围内与吸光度线性关系良好。两者淀粉水解曲线见图6,可见,SPS和PSM在消化过程中淀粉水解率随着消化时间的变化趋势大致相同,且在消化180 min时,PSM的淀粉水解率达35.59%,SPS达54.13%,PSM的淀粉水解率大幅低于SPS(低34.25%)。表明PSM的抗消化性能更好。

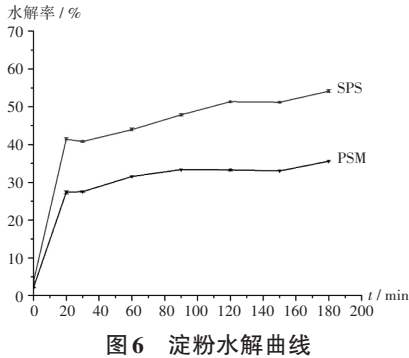


图6 淀粉水解曲线

Fig. 6 Starch hydrolysis curves

3 讨论

3.1 淀粉微球制备

淀粉颗粒形态多样,有圆形、椭圆形、多角形、片形、不规则管状等,尺寸一般为1~100 μm,且其形态及大小与植物来源和类型有关。制备淀粉微球首选淀粉颗粒形态呈圆形或椭圆形的马铃薯淀粉为原料。预试验中尝试以马铃薯淀粉为原料直接通过水包水乳液法制备淀粉微球,结果发现无法乳化,温育后的固体无法呈颗粒分散,其原因为,原料分子量越大,支链淀粉分子含量越高,溶液的黏度越大,影响水包水乳液的形成^[25]。可溶性淀粉一般通过淀粉酸水解改性而来,相较于马铃薯淀粉,可溶性淀粉中支链淀粉分子含量降低,淀粉分子量减小,溶液粘度较低,适合作为水包水乳液法制备淀粉微球的原料。

3.2 结构表征

粒径测定结果显示,PSM的平均粒径大于SPS,这与交联剂TSTP的加入,使淀粉分子之间发生聚集,形成球状结构有关。

扫描电镜结果显示,PSM表面粗糙且有孔隙和凹痕,可能是由于三偏磷酸钠与淀粉颗粒间发生化学反应形成,随着交联反应的进行,淀粉的层状结构以及螺旋结构同时受到破坏,从而使淀粉结晶受到破坏转变为无定形物质。可见,淀粉与三偏磷酸钠的交联反应不仅发生在无定形区,同时也破坏了淀粉分子的结晶区^[26]。

红外光谱显示,PSM的红外光谱与SPS基本相同,TSTP与SPS交联后,通常会在 $1\ 050\sim 970\text{ cm}^{-1}$ 波数范围产生1处新的吸收峰^[26],但在SPS的光谱图中也存在此吸收峰,其原因可能是TSTP的交联度较低,含磷量低,而SPS中自身也含有少量的磷,导致PSM红外光谱图中的特征吸收峰被覆盖^[27]。

X射线衍射图显示,SPS制备成PSM后,晶形结构由B型转变成无定形,其原因可能是由于溶液中的氢氧化钠破坏了SPS的结晶结构,同时交联反应形成的三维网络结构限制了淀粉分子的活动能力,使淀粉分子链的分子间作用力、氢键明显变弱,从而导致淀粉结晶能力降低,无法形成有序结构^[28]。

3.3 性能研究

吸水倍率和吸水速率可直观体现PSM对水溶液的亲和力^[29],从而推断出其对血液及伤口渗出液的吸收效果,是判断止血材料性能的主要指标。PSM吸水性能的提高主要与淀粉微球的孔隙和凹痕的形成有关,其增加了淀粉微球的比表面积,提高了吸附、吸水能力,并降低了体积膨胀率,有利于改善材料在应用中溶胀并减少组织压力^[30]。

热重分析结果可直接体现PSM的热稳定性,是食品和医药领域关注的重要指标。第2失重阶段,SPS及PSM的热失重率急剧增大,主要与淀粉分子链的断裂、葡萄糖单元的热分解以及微球中部分网状交联结构发生断裂,微球发生分解有关^[31]。PSM第2段失重率和热分解温度均低于SPS,其原因可能为PSM中虽然存在键能较强的交联键,但由于数量较少,所以分子间作用较弱^[18]。但从整体来看,SPS、PSM与马铃薯原淀粉热分解温度接近^[31],故PSM的热稳定性未发生显著变化。

淀粉的消化性能与多方面因素有关,如直链淀粉含量、膨胀力、颗粒表面结构及淀粉结晶结构等,淀粉水解率可较直观地反映淀粉消化快慢^[32],低消化性的淀粉产品在针对高血糖人群的低升糖指数食品中具有重要的应用前景^[33]。前20 min水解初期,SPS和PSM的

淀粉水解率均上升较快,因为在消化体系中,体积庞大且结构松散的分子极易被酶切断成较小的分子,故水解速率较快;60 min后PSM的淀粉水解率基本趋于平缓,增幅较小,SPS的淀粉水解程度增加速率也逐渐变缓,在120 min后趋于平稳,因为随着水解的进行,淀粉链变短,酶作用底物的结合点也相应减少,故后期水解速率逐渐减慢^[34]。在消化180 min时,PSM的淀粉水解率大幅低于SPS,其原因可能为淀粉交联反应形成三维网状结构和空间位阻,使淀粉酶活性中心与淀粉的结合受阻,抑制或降低了酶对淀粉糖苷键的水解作用,导致PSM的抗消化能力提高^[35];另一个原因可能为PSM的粒径相对较大,淀粉粒径大小与消化速率有关,粒径小的颗粒比表面积较大,更有利于酶的吸附结合,淀粉粒径越小消化越快,粒径越大消化越慢^[36]。

3.4 方法评价

本研究中以SPS为原料、PEG 20000为连续相、TSTP为交联剂制备的PSM,无有机溶剂残留,安全性高,粒径、表观形貌、晶体结构与SPS有明显差异,化学组成和热稳定性变化不明显,并具有多孔结构、较强的亲水性以及酶降解性,不但可作为医疗器械领域的新型可降解植物多糖止血材料用于创伤性出血,也可作为药用辅料领域的多孔药用载体材料用于挥发性、难溶性药物的包埋、吸附以及制备成具有高生物利用度、靶向特征的载药淀粉微球。同时,PSM还表现出一定的抗消化性能,可作为食品添加剂领域的低升糖指数食品添加剂,用于制作控糖特殊人群的食品。本研究可为淀粉微球的制备以及其在医药、医疗器械及功能食品等领域的应用提供参考。

参考文献

- [1] 罗 阳. 藜麦淀粉微球的制备及其在化妆品中的应用[D]. 长春:吉林农业大学,2022.
- [2] 胡 坚. 微球在药剂与化学领域的研究进展[J]. 广东化工, 2023,50(19):63-64.
- [3] WANG SK, DE PAEPE K, WIELE TV, et al. Starch - entrapped microspheres enhance gut microbiome - mediated anti - obesity effects of resistant starch in high - fat diet induced obese C57BL/ 6J mice[J]. Food Research International, 2023,172:113215.
- [4] ZHOU QL, FENG D, YANG HY, et al. Preparation, physicochemical properties, and structural characterization of resistant starch - aspirin - loaded microspheres [J]. Medical Science Monitor, 2023,29:e939711.
- [5] 蒋红艳,杨元娟,杨宗发,等. 微球给药系统及其质量评价[J]. 中国药业,2012,21(13):1-2.
- [6] QIAN JQ, CHEN Y, YANG HY, et al. Preparation and characterization of crosslinked porous starch hemostatic [J].

- International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 160: 429 – 436.
- [7] GUO YY, CHENG NQ, SUN HX, et al. Advances in the development and optimization strategies of the hemostatic biomaterials[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2023, 10: 1062676.
- [8] REN ZK, WANG YM, WU H, et al. Preparation and application of hemostatic microspheres containing biological macromolecules and others [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 257(Pt1): 128299.
- [9] CHEN JW, CHEN SN, CHENG W, et al. Fabrication of porous starch microspheres by electrostatic spray and supercritical CO₂ and its hemostatic performance [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 123: 1 – 9.
- [10] 张 瑞, 杨甜甜, 问娟娟. 具有多孔结构的淀粉微球的制备及其性能的研究进展[J]. 化工技术与开发, 2020, 49(7): 36 – 38.
- [11] 白 霞. 淀粉微球的制备及结晶性质研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [12] LUO Y, NI FT, GUO M Z, et al. Quinoa starch microspheres for drug delivery: preparation and their characteristics [J]. Food Science and Technology, 2022, 42: e126421.
- [13] 问娟娟, 崔建强, 张 爽. 玉米淀粉微球制备条件优化及其载药性研究[J]. 化学工程师, 2020, 34(9): 11 – 14.
- [14] 李 海, 张文康, 冉力通, 等. 木薯淀粉微球的制备工艺研究[J]. 广西科技大学学报, 2021, 32(3): 108 – 112.
- [15] 夏会平. 基于双水相体系淀粉微球的构建及其应用特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [16] ZHANG ZRY, HE XX, ZENG CX, et al. Preparation of cassava starch – gelatin yolk – shell microspheres by water – in – water emulsion method [J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 323: 121461.
- [17] GIDLOF Z, PEDERSEN BL, NILSSON L, et al. Utilising phase diagram to understand barley starch microsphere preparation in an aqueous two – phase system [J]. Colloids Surf A Physicochem Eng Asp, 2023, 658: 130652.
- [18] 洗学权, 黎演明, 杨 辉, 等. 凝沉型及交联型淀粉微球的水包水乳液法制备及理化特性比较研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 25 – 30.
- [19] XIA HP, KOU TT, LIU K, et al. Recrystallization kinetics of starch microspheres prepared by temperature cycling in aqueous two – phase system [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 198: 233 – 240.
- [20] LI BZ, WANG LJ, LI D, et al. Preparation and characterization of crosslinked starch microspheres using a two – stage water – in – water emulsion method [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 88(3): 912 – 916.
- [21] T / ZZB 1062 – 2019, 可吸收止血微球[S].
- [22] 范会平, 侯冰洁, 索 标, 等. 基于模拟体系研究甘薯 / 马铃薯淀粉体外消化特性及结构变化[J]. 中国食品学报, 2022, 22(8): 61 – 68.
- [23] ENGLYST HN, KINGMAN SM, CUMMINGS JH. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(Suppl 2): S33 – S50.
- [24] 韩 洁, 孙中伟, 赵 阳, 等. 环保型纳米级淀粉油层保护剂 DYB-2 的室内研究[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(2): 123 – 126.
- [25] PUNCHA – ARNON S, WANDEE Y, UTTAPAP D, et al. The effect of hydrolysis of cassava starch on the characteristics of microspheres prepared by an emulsification – crosslinking method[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 161: 939 – 946.
- [26] 许 晖, 孙兰萍, 赵大庆, 等. 马铃薯交联淀粉的制备与结构表征[J]. 中国粮油学报, 2007, 22(5): 67 – 72.
- [27] 谢 静. 淀粉微球气凝胶的制备及吸附力研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [28] 李仲谨, 余丽丽, 朱 雷. 交联淀粉微球酶降解过程的 FTIR 和 XRD 分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(1): 134 – 137.
- [29] 许 林. 复合大孔聚多糖可吸收止血材料对股动脉止血的有效性研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2021.
- [30] 李志孝. 新型抗菌复合可吸收止血微球的制备和功效研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019.
- [31] 俞力月. 马铃薯多孔淀粉的制备及吸附应用的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- [32] 蔡灿欣. 抗性淀粉的挤压法制备、性质及其应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- [33] 赵起越, 王思宇, 胡晓沛, 等. 能量缓释拟谷物淀粉微球的构建及食用品质分析[J]. 中国食品学报, 2022, 22(10): 180 – 189.
- [34] 闵玉涛, 宋彦显, 马凤青, 等. 环氧氯丙烷交联淀粉的制备及其体外消化性能的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(8): 261 – 263.
- [35] 司美双, 包尔红, 刘 宁, 等. 不同三偏磷酸钠添加量油莎豆交联抗性淀粉性质研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(12): 120 – 125.
- [36] CHEN JS, GAIKWAD V, HOLMES M, et al. Development of a simple model device for in vitro gastric digestion investigation[J]. Food & Function, 2011, 2(3 – 4): 174 – 182.

(收稿日期: 2024 – 03 – 04; 修回日期: 2024 – 12 – 06)

中国科技核心期刊 中国科技论文统计源期刊

《中国药业》杂志 欢迎投稿！ 欢迎订阅！

邮发代号: 78 – 130, 各地邮局均可订阅; 补订、破月订可向本刊办理。电话兼传真: (023) 86592565
网上投稿: <http://www.zhongguoyaoye023.com> 或中国药业在线投稿系统