

武陵山区 4 种块根类淀粉的糊化特性和冲调性质分析

Comparative analysis of physicochemical properties and instant properties of four root starches in Wuling mountain area

米 旺^{1,2} 陈 吉^{1,2} 余 佶^{1,2} 姚茂君^{1,2}

MI Wang^{1,2} CHEN Ji^{1,2} YU Ji^{1,2} YAO Mao-jun^{1,2}

麻成金^{1,2} 李运通^{1,2}

MA Cheng-jin^{1,2} LI Yun-tong^{1,2}

(1. 食药两用资源研究与高值化利用湖南省重点实验室, 湖南 吉首 416000;

2. 吉首大学化学化工学院, 湖南 吉首 416000)

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Research, Resource Mining and High-valued Utilization on Edible & Medicinal Plant, Jishou, Hunan 416000, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Jishou University, Jishou, Hunan 416000, China)

摘要:目的:探究葛根、蕨根、百合、凉薯 4 种块根类植物淀粉的糊化特性与冲调特性。方法:采用扫描电子显微镜(SEM)、快速黏度分析仪(RVA)、差式量热扫描仪(DSC)等分析淀粉的微观形态和糊化特性;对 4 种淀粉进行冲泡,并分析淀粉糊的透明度和表观形态等。结果:葛根、蕨根、凉薯淀粉的颗粒形态较为相似,大多为球形;百合淀粉颗粒较大,且形态为纺锤形。糊化特性表明,百合淀粉的峰值黏度最高,为 $(7.00 \pm 0.03) \text{ Pa} \cdot \text{s}$;葛根和百合淀粉的回生值较大,表明其易于回生。热力学特性表明,蕨根淀粉的起始糊化温度最低,为 59.4°C ,表明其容易糊化;百合淀粉的糊化焓值最高,为 15.64 J/g ,表明其糊化时需要更多的热量。冲调特性表明,葛根淀粉糊的透明度最好,其透光率为 29.11% ;而百合淀粉糊的透光率仅为 12.25% ;冲调后,葛根淀粉糊和百合淀粉糊易于形成凝胶,但流动性较差;蕨根淀粉糊和凉薯淀粉糊凝胶能力较差,易于流动。结论:百合淀粉和葛根淀粉的冲调性质相似,具有冲调类食品的开发潜力;蕨根淀粉和凉薯淀粉回生值较低,糊的流动性较好,可用于抑制食品的回生。

关键词:淀粉;葛根;蕨根;百合;凉薯;糊化特性;冲调性质

Abstract: **Objective:** Kudzu root, fern root, lily, and yam bean are characteristic plant resources in Wuling Mountain Area, the gelatinization and instant properties of these four starches was analyzed in this study. **Methods:** SEM, RVA, and DSC were used to investigate the gelatinization properties of the starches, and the transparency and apparent fluidity of starch pastes was used to analysis the instant properties. **Results:** The granule of kudzu root, fern root, and yam bean starches showed similar morphology, most of which are spherical, but lily starch exhibited spindle-shaped morphology. The RVA results showed that the peak viscosity of lily starch was the highest [$(7.00 \pm 0.03) \text{ Pa} \cdot \text{s}$] among these four starches. The setback value of kudzu root starch and lily starch was more than fern root starch and yam bean starch, which indicating that kudzu root starch and lily starch was easy to retrograde. The DSC results showed that the initial gelatinization temperature of fern root starch was 59.4°C , which was the lowest among these starches, indicating that it was easy to gelatinize. Lily starch has the highest gelatinization enthalpy, which is 15.64 J/g , indicating that more heat was required for gelatinization. After gelatinization, the kudzu root starch paste has the best transparency with a light transmittance of 29.11% , while lily starch paste has a light transmittance of only 12.25% . Kudzu root starch paste and lily starch paste was easy to form gels, but the fluidity was poor.

基金项目:吉首大学大学生创新创业训练计划项目(编号: 20222003);吉首大学引进人员科研资助项目(编号: JSDX20211110)

作者简介:米旺,男,吉首大学在读本科生。

通信作者:李运通(1992—),男,吉首大学讲师,博士。

E-mail: litong200933@163.com

收稿日期:2022-10-12 **改回日期:**2023-01-24

Conclusion: Lily starch and kudzu root starch have similar instant properties and have potential for the development of instant foods, fern root starch and cold potato starch showed a lower retrogradation value, and their paste showed better fluidity, which can be used to inhibit the retrogradation of food.

Keywords: starch; kudzu; fern; lily; yam; pasting properties; instant properties

湖南武陵山区葛根、蕨根、百合、凉薯等特色植物资源十分丰富。葛(*Pueraria montana* var. *lobata*)是一种豆科植物,分为粉葛和柴葛。种植葛以粉葛为主,其淀粉含量高于柴葛,鲜葛根中淀粉含量为 15%~34%^[1],粉葛中葛根素等黄酮类物质的含量低于柴葛^[2]。蕨(*Pteridium aquilinum*)以野生为主,其干基和根中含有 35%~40% 的淀粉^[3]。百合(*Lilium brownii* var. *viridulum* Baker)是一种传统作物,百合鳞茎中淀粉的含量在 60%左右^[4],在湘西地区大面积种植的为卷丹百合,其中龙山县种植为全州最多,常年种植面积稳定在 5 300 hm²左右,占全国百合种植面积的 20%,产量和销量均居全国第一^[5]。凉薯(*Pachyrhizus erosus*)原产于亚马逊区域和墨西哥半干旱地区,具有高产量、易种植、高营养价值等特点,其干基中的淀粉含量约为 22.29%^[6]。这 4 种作物淀粉中葛根淀粉由于具有较低的糊化温度,已经被开发成冲调饮品,商业化程度较高。蕨根、百合和凉薯等淀粉是否也具有与葛根淀粉类似的糊化特性和冲调性质,目前暂无相关的比较研究。

研究拟以湿法从葛根、蕨根、百合、凉薯的块根或块茎中分离得到 4 种淀粉,采用扫描电子显微镜(SEM)、快速黏度分析仪(RVA)、差式量热扫描仪(DSC)等分析各类淀粉的颗粒微观形态、黏度变化曲线、糊化温度、糊化焓等指标,并对 4 种淀粉进行冲泡,对比其糊的透明度和表观状态,旨在为武陵山区块根或块茎类淀粉的生产与应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

葛根、蕨根、百合、凉薯:市售。

1.1.2 主要仪器设备

光学显微镜:MoticAE2000 型,北京汗盟紫星仪器仪表有限公司;

组织捣碎机:JJ-2 型,江苏天翎仪器有限公司;

可见分光光度计:7230G 型,上海仪电分析仪器有限公司;

高速离心机:LXJ-IIC 型,上海安亭科学仪器厂;

快速黏度分析仪:RVA-Techmaster 型,波通瑞华科学仪器公司;

差示扫描量热计:DSC3500 型,德国耐驰仪器制造有限公司。

1.2 淀粉的提取

根据王倩等^[7]的方法,并进行适度修改。称取 500 g 洗净的块根或块茎与 1 000 mL 蒸馏水混合,用组织破碎机处理 5 min,使用纱布进行过滤,滤渣清洗 3 次,收集 3 次滤液,弃去滤渣。将滤液静置 12 h 后,弃去上层滤液,保留沉淀。向沉淀中加入适量蒸馏水并搅拌均匀,以 4 000 r/min 离心 10 min,弃上清液,用药匙轻轻刮去沉淀表面的黄褐色杂质,该过程重复 3 次。收集淀粉,自然晾干,用研钵进行研磨后,装入保鲜袋中常温下保存备用。

1.3 微观形态

1.3.1 普通光学显微镜观察 称取 0.05 g 淀粉于 20 mL 试管中,用蒸馏水配制成 0.25 g/100 mL 的淀粉悬浮液,充分摇匀,用胶头滴管取 1~2 滴悬浮液于洁净载玻片上,盖上盖玻片,在光显微镜下先以 10×40 倍率进行观察,采用 Motic5.0 相机随机拍照。

1.3.2 扫描电子显微镜(SEM)观察 参考 Shah 等^[8]的方法,拍取样品在不同放大倍数下(×500 和 ×2 000)的微观结构照片。

1.4 糊化特性

1.4.1 快速黏度曲线(RVA) 采用 GB/T 24853—2010《小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定 快速黏度仪法》标准程序 1 测试,得到 RVA 曲线及相关参数。

1.4.2 热力学特性曲线(DSC) 参考 Li 等^[9]的方法。

1.5 冲调性质

1.5.1 淀粉糊的透明度 参考 Hu 等^[10]的方法,并做适度修改。称取淀粉 0.5 g 于 100 mL 烧杯中,加 50 mL 水配制成 1 g/100 mL 的淀粉乳液,沸水浴加热 30 min,搅拌使其糊化,冷却至室温,蒸馏水为空白调零,在 620 nm 处测试淀粉糊的透光率(T),以透光率来表示透明度。

1.5.2 淀粉糊的表观形态 分别称取淀粉 3.0 g 于 100 mL 烧杯中,然后加入 50 mL 沸水配置成 6 g/100 mL 的淀粉乳液,玻璃棒搅拌 3 min,立即用勺子舀起,观察其拉丝情况^[11]。

1.6 数据统计与分析

采用 Excel 2019 进行图表的绘制,SPSSAU 进行统计学分析。

2 结果与分析

2.1 微观形态

4 种淀粉的微观形态和结构如图 1 所示。葛根淀粉的颗粒形态多为球形或多角形,表面光滑,可见明显的脐点。蕨根淀粉颗粒结构形态多为球形、半球形等不规则形状,表面光滑,其形态与葛根淀粉相似。百合淀粉颗粒的结构形状多呈纺锤形,表面光滑,与 Zhang 等^[12]和 Li

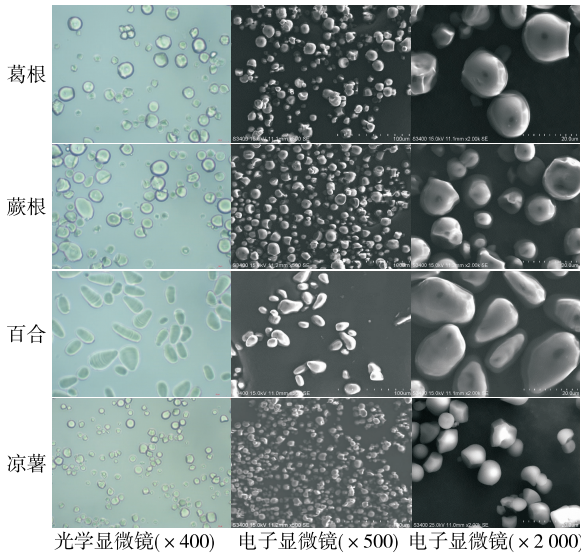


图 1 葛根、蕨根、百合、凉薯 4 种淀粉颗粒的微观形态
Figure 1 Microscopic morphology of kudzu root, fern root, lily and yam bean starches

表 1 葛根、蕨根、百合、凉薯 4 种淀粉的糊化特性参数[†]

Table 1 RVA results of kudzu root, fern root, lily and yam bean starches

样品	峰值黏度/(Pa·s)	最低黏度/(Pa·s)	衰减值/(Pa·s)	最终黏度/(Pa·s)	回生值/(Pa·s)	糊化温度/℃
葛根淀粉	4.04±0.01 ^d	2.07±0.00 ^c	1.97±0.00 ^d	3.27±0.04 ^b	1.20±0.04 ^a	69.42±0.08 ^b
蕨根淀粉	5.29±0.13 ^b	2.26±0.00 ^b	3.03±0.12 ^b	3.09±0.05 ^c	0.83±0.05 ^c	68.65±0.85 ^b
百合淀粉	7.00±0.03 ^a	3.48±0.01 ^a	3.52±0.01 ^a	4.64±0.00 ^a	1.16±0.01 ^a	69.05±0.35 ^b
凉薯淀粉	4.63±0.00 ^c	2.17±0.01 ^b	2.46±0.01 ^c	3.16±0.02 ^{bc}	0.98±0.01 ^b	72.35±0.40 ^a

[†] 同列字母不同代表数据间差异显著($P<0.05$)。

研究中发现百合淀粉的颗粒尺寸显著大于其他 3 种淀粉,淀粉颗粒的尺寸越大,糊化过程中淀粉吸水膨胀得更大,则表现出较大的峰值黏度。有研究^[17]对比了玉米淀粉、大米淀粉、小麦淀粉、木薯淀粉、马铃薯淀粉等的峰值黏度,结果得到马铃薯淀粉的峰值黏度远高于其他淀粉,这与马铃薯淀粉颗粒尺寸较大有关。对比大、中、小 3 种颗粒尺寸马铃薯淀粉的峰值黏度,得到淀粉的粒径与峰值黏度呈正相关关系^[18]。

衰减值所反映的是热糊淀粉的稳定性,葛根淀粉的衰减值为 (1.97 ± 0.00) Pa·s,明显低于其他 3 种淀粉,表明葛根淀粉颗粒在升温糊化过程中不易破裂,稳定性最好。葛根淀粉和百合淀粉的回生值分别为 (1.20 ± 0.04) , (1.16 ± 0.01) Pa·s,高于蕨根淀粉和凉薯淀粉。回生值所反映的是淀粉糊化冷却过程中的稳定性和老化程度,一定程度的回生可以增加淀粉凝胶的硬度^[19]。淀粉的成糊温度与淀粉颗粒的高结晶度结构有关^[20],葛根、蕨根、百合、凉薯 4 种淀粉的成糊温度分别为 69.42, 68.65, 69.05, 72.35 ℃,凉薯淀粉的糊化温度要明显大于其他 3 种淀粉,说明其不易糊化。

等^[13]的观察结果相一致。凉薯淀粉颗粒表面光滑,颗粒结构呈现出多角形等不规则结构,粒径明显小于其他 3 种淀粉,与张喻等^[14]的研究结果一致。对 4 种淀粉颗粒的长轴直径进行分析,其尺寸大小排序为百合>蕨根>葛根>凉薯。淀粉的微观形态和颗粒大小通常与淀粉的品种有关,淀粉颗粒的直径通常在 1~100 μm,且块根和块茎类淀粉的直径一般大于谷物淀粉^[15]。淀粉颗粒的形态和大小是淀粉分子结构和精细结构的外在表现,也是淀粉糊化特性和冲调性质的直接影响因素。

2.2 糊化特性

2.2.1 快速黏度曲线 采用快速黏度分析仪测定葛根、蕨根、百合、凉薯 4 种淀粉的快速黏度曲线,糊化特性参数见表 1。葛根淀粉的峰值黏度为 (4.04 ± 0.01) Pa·s,显著低于其他 3 种淀粉($P<0.05$)。Yoo 等^[16]的研究也表明,葛根淀粉的峰值黏度低于蕨根淀粉。百合淀粉的峰值黏度为 (7.00 ± 0.03) Pa·s,显著高于其他 3 种淀粉($P<0.05$),可能与百合淀粉颗粒较大有关,在微观形态的比较

2.2.2 热力学特性曲线 采用差示扫描热量仪测定葛根、蕨根、百合、凉薯 4 种淀粉的热力学特性,结果如图 2 所示。葛根、蕨根、百合、凉薯 4 种淀粉的初始糊化温度分别为 62.3, 59.4, 62.1, 62.9 ℃,峰值糊化温度分别为 67.3, 66.9, 65.7, 69.7 ℃。起始糊化温度反映的是淀粉开始糊化时所需要的能量;峰值糊化温度反映的是不同淀粉晶体结构及其完整性,温度越高,表示淀粉晶体的结构

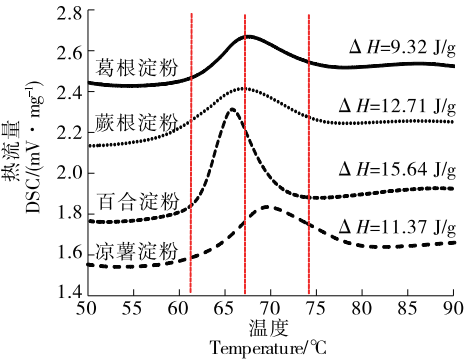
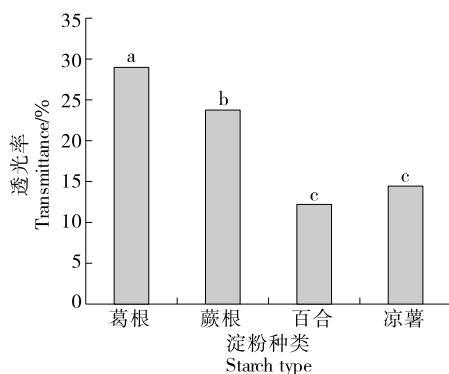


图 2 葛根、蕨根、百合、凉薯 4 种淀粉的热力学特性曲线
Figure 2 Thermodynamic curves of kudzu root, fern root, lily and yam bean starch

越完整,越不易被破坏^[21-23]。4 种淀粉中凉薯淀粉起始糊化温度最高,说明其开始糊化时所需的温度最高;蕨根淀粉的起始糊化温度最低,表明其易糊化,与 2.2.1 快速黏度曲线的测试结果一致。热焓值反映的是破坏淀粉晶体中的双螺旋结构所需要吸收的能量,热焓值越小,说明所需要的能量越少,晶体中的双螺旋结构越容易被破坏^[21]。4 种淀粉中葛根淀粉的热焓值最低,为 9.32 J/g;百合淀粉的热焓值最高,为 15.64 J/g,结果表明葛根淀粉糊化所需要的能量较低。

2.3 冲调特性

2.3.1 淀粉糊的透明度 透明度是衡量淀粉冲调品质的重要指标之一,通常认为透明度越高,淀粉糊的感官性质越好。采用可见分光光度计测定 4 种淀粉糊的透光率,结果如图 3 所示。葛根、蕨根、百合、凉薯 4 种淀粉中葛根淀粉糊的透明度最好(透光率为 29.11%),而百合淀粉和凉薯淀粉的透明度较差(透光率分别为 12.25%, 14.39%)。淀粉糊的透明度与淀粉中的磷含量有关,磷含量高的淀粉会产生更透明的糊^[24]。有研究^[16,25]表明,葛根淀粉中的磷含量显著高于蕨根淀粉和凉薯淀粉,因此磷含量较高可能是葛根淀粉糊的透明度高于其他 3 种淀粉的原因。



字母不同代表数据间差异显著($P < 0.05$)

图 3 葛根、蕨根、百合、凉薯淀粉的透光率

Figure 3 Light transmittance of kudzu root, fern root, lily and yam bean starch

2.3.2 淀粉糊的表现形态 淀粉糊的表现形态所反映的是淀粉的凝胶特性,淀粉糊的拉丝效果越好说明糊的流动性越好。试验发现,葛根淀粉糊和百合淀粉糊的流动性较差,有较强的黏性,说明葛根淀粉和百合淀粉的成凝胶能力较强;而蕨根淀粉糊、凉薯淀粉糊的表现形态相近,流动性较好,黏性较弱,说明蕨根淀粉和凉薯淀粉的成凝胶能力较差。因此,推测葛根淀粉和百合淀粉比蕨根淀粉和凉薯淀粉更容易形成凝胶。

3 结论

葛根、蕨根、百合、凉薯 4 种淀粉在微观结构、糊化特

性、冲调特性等方面存在明显差异。葛根淀粉、蕨根淀粉、凉薯淀粉的颗粒形态较为相似,大多为球形;而百合淀粉颗粒较为特别,表现为颗粒较大,形态为纺锤形。百合淀粉的峰值黏度显著高于其他 3 种淀粉;葛根淀粉和百合淀粉的回生值较大。蕨根淀粉的起始糊化温度最低,为 59.4 °C,表明其容易糊化;百合淀粉的热焓值最高,为 15.64 J/g,表明其糊化时需要更多的热量。冲调特性表明,葛根淀粉糊的透明度最好,其透光率为 29.11%;而百合淀粉糊的透光率仅为 12.25%,透明度较差;从淀粉糊的表现形态来看,葛根淀粉和百合淀粉易于形成凝胶,流动性较差;蕨根淀粉和凉薯淀粉凝胶能力较差,易于流动。综上,葛根淀粉糊透明度好,成凝胶能力强,但易于回生;蕨根淀粉和凉薯淀粉糊的流动性较好,回生值较低,可用于抑制食品的回生;百合淀粉颗粒较大,峰值黏度高,具有食品增稠剂的应用潜力。

参考文献

- [1] 卢紫君, 蔡芳, 王少华, 等. 野葛与粉葛淀粉的结构及物化特性比较[J]. 现代食品科技, 2021, 37(8): 109-118.
LU Z J, CAI F, WANG S H, et al. Comparison of structures and physicochemical properties of *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi and *Pueraria lobata* var. *thomsonii* starches[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(8): 109-118.
- [2] 王丽婷, 郭双华, 邹慧岩, 等. 葛根中葛根素含量的测定[J]. 广州化工, 2021, 49(22): 73-75.
WANG L T, GUO S H, ZOU H Y, et al. Content determination of puerarin in kudzu[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2021, 49(22): 73-75.
- [3] ZHANG S R, ZHONG G, LIU B Y, et al. Physicochemical and functional properties of fern rhizome (*Pteridium aquilinum*) starch[J]. Starch-Stärke, 2011, 63(8): 468-474.
- [4] 李林静, 唐汉军, 李高阳, 等. 湖南湘西百合营养及淀粉理化特性研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(10): 25-31.
LI L J, TANG H J, LI G Y, et al. Nutritional and starch physicochemical properties of lily grown in Xiangxi of hunan[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(10): 25-31.
- [5] 刘英, 邓文, 黄振国, 等. 湘西州龙山县百合产业布局优化研究[J]. 湖南农业科学, 2019(8): 96-99.
LIU Y, DENG W, HUANG Z G, et al. Research on the layout optimization for lily industry of Longshan county of Xiangxi autonomous prefecture in Hunan[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2019(8): 96-99.
- [6] BUCKMAN E S, ODURO I, PLAHAR W A, et al. Determination of the chemical and functional properties of yam bean (*Pachyrhizus erosus* (L.) Urban) flour for food systems[J]. Food Science & Nutrition, 2018, 6(2): 457-463.
- [7] 王倩, 张鹏超, 余倩莎, 等. 鲜龙牙百合淀粉的提取工艺研究[J].

- 化学与生物工程, 2016, 33(3): 33-35.
- WANG Q, ZHANG P C, YU Q S, et al. Extraction of starch from fresh longya lillium[J]. Chemistry & Bioengineering, 2016, 33(3): 33-35.
- [8] SHAH A, MASOODI F A, GANI A, et al. In-vitro digestibility, rheology, structure, and functionality of RS3 from oat starch[J]. Food Chemistry, 2016, 212: 749-758.
- [9] LI Y T, OBADI M, SHI J L, et al. Rheological and thermal properties of oat flours and starch affected by oat lipids[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 102: 103337.
- [10] HU A J, LI L, ZHENG J, et al. Different-frequency ultrasonic effects on properties and structure of corn starch[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(14): 2 929-2 934.
- [11] HSIEH C F, LIU W, WHALEY J K, et al. Structure and functional properties of waxy starches [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 238-254.
- [12] ZHANG D L, XU H S, JIANG B, et al. Effects of ultra-high pressure on the morphological and physicochemical properties of lily starch[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(2): 952-962.
- [13] LI H, WANG R R, LIU J, et al. Effects of heat-moisture and acid treatments on the structural, physicochemical, and in vitro digestibility properties of lily starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148: 956-968.
- [14] 张喻, 章丽琳, 曾嵘, 等. 凉薯淀粉的理化性质研究[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(9): 19-22.
- ZHANG Y, ZHANG L L, ZENG R, et al. Physicochemical properties of yam bean starch[J]. Cereals & Oils, 2016, 29(9): 19-22.
- [15] VAMADEVAN V, BERTOFT E. Structure-function relationships of starch components[J]. Starch-Stärke, 2015, 67(1/2): 55-68.
- [16] YOO S H, PERERA C, SHEN J, et al. Molecular structure of selected tuber and root starches and effect of amylopectin structure on their physical properties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(4): 1 556-1 564.
- [17] AI Y F, JANE J. Gelatinization and rheological properties of starch [J]. Starch-Stärke, 2015, 67(3/4): 213-224.
- [18] NODA T, TAKIGAWA S, MATSUURA-ENDO C, et al. Physicochemical properties and amylopectin structures of large, small, and extremely small potato starch granules[J]. Carbohydrate Polymers, 2005, 60(2): 245-251.
- [19] NOOSUK P, HILL S E, PRADIPASENA P, et al. Structure-viscosity relationships for Thai rice starches [J]. Starch-Stärke, 2003, 55(8): 337-344.
- [20] 汪兰, 邓乾春, 张芸, 等. 银杏淀粉颗粒结构及物化特性的研究[J]. 中国粮油学报, 2007(4): 66-70.
- WANG L, DENG Q C, ZHANG Y, et al. Morphological and physicochemical properties of ginkgo starch [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2007(4): 66-70.
- [21] MIAO M, ZHANG T, JIANG B. Characterisations of kabuli and desi chickpea starches cultivated in China [J]. Food Chemistry, 2009, 113(4): 1 025-1 032.
- [22] HOOVER R. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: A review[J]. Carbohydrate Polymers, 2001, 45(3): 253-267.
- [23] MISHRA S, RAI T. Morphology and functional properties of corn, potato and tapioca starches[J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(5): 557-566.
- [24] ZHAO Y G, ZHU X Y, FANG Y P. Structure, properties and applications of kudzu starch [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 119: 106817.
- [25] SRICHUWONG S, SUNARTI T C, MISHIMA T, et al. Starches from different botanical sources II: Contribution of starch structure to swelling and pasting properties [J]. Carbohydrate Polymers, 2005, 62(1): 25-34.
-
- (上接第 93 页)
- [10] 魏浩林, 樊芸廷, 付滋翔, 等. 基于拓扑与尺寸优化的飞机发动机支撑架轻量化设计[J]. 航空精密制造技术, 2021, 57(4): 1-6.
- WEI H L, FAN Y T, FU Z X, et al. Lightweight design of aircraft engine support frame based on topology and size optimization[J]. Aeronautical Precision Manufacturing Technology, 2021, 57(4): 1-6.
- [11] 孙晨光, 刘宇红, 冀鹏飞, 等. SCARA 机器人大臂结构模态分析与拓扑优化[J]. 现代制造工程, 2018(7): 51-57, 73.
- SUN C G, LIU Y H, JI P F, et al. Structural modal analysis and topology optimization of SCARA manipulator [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018(7): 51-57, 73.
- [12] 焦洪宇, 周奇才, 李文军, 等. 基于变密度法的周期性拓扑优化[J]. 机械工程学报, 2013, 49(13): 132-138.
- JIAO H Y, ZHOU Q C, LI W J, et al. Periodic topology optimization based on variable density method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(13): 132-138.
- [13] 苏绍娟, 王国回, 张祥. V 型无压载水油船货舱中横剖面拓扑优化[J]. 船舶工程, 2022, 44(4): 58-63.
- SU S J, WANG G H, ZHANG X. Topological optimization of cross section in cargo hold of V-type no-ballast tanker [J]. Ship Engineering, 2022, 44(4): 58-63.
- [14] 陈静, 杨泽龙, 安勇成, 等. 基于 ANSYS 的立柱动态特性分析与拓扑优化[J]. 机械设计, 2015, 32(6): 61-65.
- CHEN J, YANG Z L, AN Y C, et al. Dynamic characteristics analysis and topology optimization of column based on ANSYS[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(6): 61-65.
- [15] 王龙, 王云霞, 陈健飞, 等. 光伏板清扫机器人支撑架轻量化优化设计[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(4): 182-185.
- WANG L, WANG Y X, CHEN J F, et al. Lightweight optimization design of photovoltaic panel cleaning robot support frame [J]. Machine Design and Research, 2018, 34(4): 182-185.