

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.80188

干燥方式对葛粉—脂肪酸复合物 冲调性的影响

Effects of different drying methods on the reconstituability of kudzu
powder-fatty acid complexes

张志林 张璇 徐苑瑞 罗舜菁 刘成梅

ZHANG Zhi-lin ZHANG Xuan XU Yuan-rui LUO Shun-jing LIU Cheng-mei

(南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 江西 南昌 330047)

(State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University,
Nanchang, Jiangxi 330047, China)

摘要:目的:改善葛粉冲调性。方法:将葛粉与月桂酸共糊化后,通过不同干燥方式制备成葛粉—脂肪酸复合物,从晶体结构、微观结构、堆积密度、吸水性指数和膨胀势的变化,探究干燥方式对复合物冲调性的影响。结果:干燥方式影响复合物的吸水能力,从而影响复合物的冲调性。与鼓风干燥和远红外干燥相比,喷雾干燥和冷冻干燥制备的复合物堆积密度更小、颗粒表面更加不平整、无定型结构更多,使得其吸水能力更强,冲调性更好。结论:喷雾干燥和冷冻干燥制备的复合物用(95±2)℃热水直接冲调后,结块率为4.6%~6.0%,比原葛粉降低36.3%以上,说明葛粉—脂肪酸复合物具有开发成为热水冲调即食葛粉的潜力。

关键词:葛粉;干燥方式;喷雾干燥;冷冻干燥;脂肪酸;冲调性;结块率

Abstract: Objective: This study aimed to improve the reconstituability of kudzu powder. **Methods:** The kudzu powder-fatty acid complexes were prepared by different drying methods after co-gelatinization of kudzu powder with lauric acid, and investigated the effects of drying methods on the instant properties of the complexes from the changes of crystal structure, microstructure, bulk density, water absorption index and swelling power. **Results:** The drying method influenced the water absorption capacity of the

complexes, there by affected the reconstituability of the complexes. Compared with oven drying and far-infrared drying, the complexes prepared by spray drying and freeze-drying had lower bulk density, more uneven particle surface and more amorphous structures, which made them more absorbent and better reconstituability. **Conclusion:** The agglomeration rate of the spray-dried and freeze-dried complexes was 4.6% ~ 6.0% after directly mixing with hot water at (95±2) °C, which was 36.3% lower than that of the native kudzu powder, indicating that the kudzu powder-fatty acid complexes have the potential to be developed into hot water ready-to-eat kudzu powder.

Keywords: kudzu powder; drying method; spray drying; freeze drying; fatty acid; reconstituability; agglomeration rate

葛粉是一种富含异黄酮等活性物质的冲调食品^[1]。然而,葛粉用热水直接冲调时易结块,严重影响食品品质。葛粉结块的原因是一部分葛粉与热水接触后迅速糊化,形成凝胶网络,包裹剩余未糊化的葛粉并阻碍它们进一步吸收水分糊化,最终产生外层为凝胶,内部为未糊化葛粉的块状物^[2]。为了让冲调后的葛粉不产生结块、质地细腻并且具有黏稠感,传统的解决方式是先将葛粉用冷水调凉,再用热水冲调。这将增加冲调时间,给消费者带来不便。为此,前人做了大量的研究改善葛粉冲调性,其主要思路有4种:①抑制葛粉的糊化进程^[2];②提高葛粉的吸水速率^[3];③提高葛粉在水中的分散性^[4];④提高葛粉在水中的溶解度^[5]。

淀粉在糊化时,直链淀粉浸出,此时若有配体(碘、乙醇和脂肪酸等)存在,将会形成淀粉—配体复合物^[6]。现有研究^[7]表明,添加少量脂肪酸即可与淀粉形成复合物,从而抑制加热时淀粉颗粒的膨胀。据此推测,通过与脂

基金项目:国家自然科学基金地区科学基金项目(编号:32060558);江西省科技厅重点研发计划(编号:20212BBF6303);江西省中央引导地方科技发展资金项目(编号:20212ZDD02008);江西省研究生创新专项资金(编号:YC2020-S003)

作者简介:张志林,男,南昌大学在读硕士研究生。

通信作者:刘成梅(1964—),男,南昌大学教授,博士。

E-mail: liuchengmei@aliyun.com

收稿日期:2022-03-11

肪酸复合或许能够降低葛粉的糊化速率,使其在热水中无法快速形成凝胶网络,从而避免葛粉颗粒因被凝胶网络包裹而来不及充分吸水所导致的结块现象,改善葛粉冲调性。淀粉-脂肪酸复合物是一种新型抗性淀粉,将其应用于膳食中,不仅能够满足人们对低糖、低能量食品的需求,更能够提高食品的营养价值,所以淀粉-脂肪酸复合物在食品当中的应用受到学者们密切关注^[8]。目前,关于葛粉-脂肪酸复合物的冲调性研究尚未见诸于报道。

此外,不同干燥方式制备的产品,其结构会有所差异。常丰丹^[9]发现热风干燥比冷风干燥更有利玉米淀粉-脂肪酸复合物的形成。Ahmed等^[10]发现通过冷冻干燥制备的香蕉粉颗粒呈现多孔状结构,热风干燥制备的香蕉粉颗粒较为平整,使得前者的堆积密度显著低于后者。Dueck等^[11]发现热风干燥、微波干燥和过热蒸汽干燥影响了小麦的堆积密度和孔隙率,从而影响了小麦在蒸煮过程中的吸水能力。由此推测,干燥方式可能会影响淀粉-脂肪酸复合物的吸水能力,从而导致其冲调性的差异。

研究拟将葛粉与月桂酸(占葛粉干基质量的3%)共糊化后,通过不同干燥方式(喷雾干燥、冷冻干燥、鼓风干燥和远红外干燥)制备成葛粉-脂肪酸复合物,从晶体结构、微观结构、堆积密度、吸水性指数和膨胀势的变化,探究干燥方式对葛粉-脂肪酸复合物在(95±2)℃热水直接冲调时的结块性、流变性质和稳定性的影响,旨在为冲调型粉状食品的制备提供理论指导。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与amp;仪器

1.1.1 材料与amp;试剂

葛根:粉葛,广西南宁源源特产店;

月桂酸:纯度为98%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

其他试剂均为分析纯及以上。

1.1.2 主要仪器设备

小型喷雾干燥仪:B-290型,瑞士Buchi公司;

冷冻干燥仪:4.5 L型,美国Labconco公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DGG-9240A型,上海森信实验仪器有限公司;

远红外加热炉:DIR613C型,重庆雅马拓科技有限公司;

扫描电子显微镜:SU8100型,日本Hitachi公司;

光学显微镜:Ni-U型,日本Nikon公司;

流变仪:MCR302型,奥地利Anton Paar公司。

1.2 试验方法

1.2.1 葛粉的制备

将葛根去皮、切块、绞碎后装入

200目的滤袋中,然后在适量蒸馏水中揉搓、浸提10 min。将所得浸提液沉淀3 h,去除上清液,该步骤重复3次,再将所得沉淀在40℃烘箱中干燥至水分含量为10.0%以下,过100目筛,即得到原葛粉,该样品作为对照组(NK)。

1.2.2 葛粉-脂肪酸复合物的制备 将原葛粉配成5.0%的悬浮液置于95℃的水浴锅中进行搅拌加热,当悬浮液温度达到60℃时,加入占葛粉干基质量3%的溶解于无水乙醇中的月桂酸。继续搅拌加热25 min后在室温下冷却2 h,分别经喷雾干燥(进风温度175℃,进料速度0.4 L/h,物化压力 4×10^4 Pa)、冷冻干燥(加热温度-60℃,真空度1 Pa)、鼓风干燥(热风温度40℃)、40℃远红外加热炉干燥(红外辐射温度40℃)至水分含量为10.0%以下,再用无水乙醇洗涤3次去除未复合的月桂酸,晾干,过100目筛。最终获得喷雾干燥葛粉-脂肪酸复合物(SK-C12)、冷冻干燥葛粉-脂肪酸复合物(FK-C12)、鼓风干燥葛粉-脂肪酸复合物(OK-C12)和远红外干燥葛粉-脂肪酸复合物(IK-C12)。

1.2.3 晶体结构 采用X射线衍射仪测定葛粉-脂肪酸复合物的晶体结构。X射线衍射仪上的铜管在40 mA和40 kV下工作并产生一定波长的Cu K α 射线。在5°~35°的衍射角(2 θ)范围内,以每秒0.02°的步长扫描样品得到样品的衍射图谱。根据式(1)计算淀粉颗粒的相对结晶度^[12]。

$$R_c = \frac{A_c}{A_c + A_a} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R_c ——相对结晶度,%;

A_c ——结晶区域面积;

A_a ——无定形区域面积。

1.2.4 电镜扫描 将葛粉-脂肪酸复合物粘附在贴有导电胶的铝台上并喷涂金薄膜,用扫描电镜在加速电压为5 kV,放大倍数为500倍下观察样品的微观结构。

1.2.5 堆积密度的测定 参照Zhang等^[13]的方法,并做适当修改。将10 g葛粉-脂肪酸复合物慢慢加入50 mL量筒中,再轻轻敲打量筒直至样品的高度不再变化,记录此时葛粉-脂肪酸复合物的体积。按式(2)计算堆积密度。

$$B = \frac{M}{V}, \quad (2)$$

式中:

B ——堆积密度,g/mL;

M ——样品的干重,g;

V ——样品的体积,mL。

1.2.6 吸水性指数的测定 参照何兴芬等^[14]的方法并加以修改。准确称取2.5 g葛粉-脂肪酸复合物置于

50 mL 离心管中,加入 30 mL 蒸馏水,在 30 °C 水浴震荡 30 min 后,7 000×g 离心 15 min。倒出上清液,称量离心管中沉淀的质量。按式(3)计算吸水性指数(water absorption index, WAI)。

$$I_{WA} = \frac{W}{M} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

- I_{WA} ——吸水性指数, %;
- W ——倒出上清液后沉淀质量, g;
- M ——样品的干重, g。

1.2.7 膨胀势的测定 参照黄琪等^[15]的方法略做修改。将 0.5 g 葛粉—脂肪酸复合物分散于 25 mL 蒸馏水中,在 95 °C 下水浴震荡加热 30 min。加热期间每隔 5 min 上下剧烈摇晃样品以保证充分糊化。冷却至室温,7 000×g 离心 15 min,将上清液倒掉,称量沉淀物质量,再将沉淀物在 105 °C 烘箱中干燥至恒重。按式(4)计算膨胀势。

$$P_s = \frac{W_1}{W_2}, \quad (4)$$

式中:

- P_s ——膨胀势, g/g;
- W_1 ——沉淀物质量, g;
- W_2 ——沉淀物干燥至恒重质量, g。

1.2.8 冲调性分析

(1) 结块率:根据 Wang 等^[3]的方法略作修改。将 50 mL 蒸馏水加热至(95±2) °C,加入约 3.2 g 样品,用打蛋器匀速搅拌 60 s,得到的冲调液过筛。将筛得的结块置于烘箱中干燥至恒重,按式(5)计算结块率。

$$A_r = \frac{W_2}{W_1} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

- A_r ——结块率, %;
- W_1 ——样品的干重, g;
- W_2 ——结块干燥至恒重质量, g。

(2) 结块的显微观察:用显微镜观察葛粉—脂肪酸复合物冲调后产生的块状物结构。将 1.2.8(1)中冲调液过筛得到的结块置于载玻片上,再滴适量水使其分散后,用光学显微镜进行观察。

(3) 流变性质:用流变仪测定葛粉—脂肪酸复合物的流变性质。将 1.2.8(1)中冲调液过筛得到的滤液转移至测定平台上。选用直径 50 mm 的平板模具,平板间隙设为 1 mm。在 25 °C 缓苏 5 min 后进行稳定剪切测试。剪切速率从 0.1 s⁻¹ 增至 300 s⁻¹,记录剪切应力值和黏度值随剪切速率的变化。数据采用 Power law 模型拟合:

$$\sigma = K \dot{\gamma}^n, \quad (6)$$

式中:

- σ ——剪切应力, Pa;

K ——稠度系数, Pa·sⁿ;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率, s⁻¹;

n ——流动行为指数。

(4) 稳定性:根据孙玉清等^[16]的方法略做修改。将 1.2.8(1)中冲调液倒入 100 mL 透明量筒中静置。分别在 0, 1, 2, 3, 4, 6 h 时记录量筒中上清液体积和冲调液总体积,按式(7)计算稳定系数。

$$R = \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right) \times 100\%, \quad (7)$$

式中:

- R ——稳定系数, %;
- V_1 ——上清液体积, mL;
- V_2 ——冲调液总体积, mL。

1.2.9 数据统计与分析 数据以平均值±标准偏差表示。用 Origin 2018 作图,用 SPSS 25.0 进行方差分析,检验方法为 Turkey's ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 晶体结构

葛粉—脂肪酸复合物的 X 射线衍射图谱如图 1 所示。原葛粉的晶型为 A 型,在 15°, 17°, 18°, 23° (2θ) 处有明显的衍射峰,与 Reddy 等^[17]的结果一致。葛粉—脂肪酸复合物在 13°, 20° 处出现两个较强的衍射峰,在 7.5° 处出现一个微弱的衍射峰,这是典型的 V 型结晶特征峰^[18],表明葛粉—脂肪酸复合物存在 V 型晶体结构。特别的是,OK-C12 和 IK-C12 在 17.5° 处存在一个微弱的衍射峰,可能是因为鼓风干燥和远红外干燥所需时间长,产生老化现象^[19]。喷雾干燥时间短,冷冻干燥在干燥前对样品进行了液氮冷冻,所以 SK-C12 和 FK-C12 老化程度低,在 17.5° 处未产生衍射峰。SK-C12 和 FK-C12 的结晶度 (11.96%, 14.00%) 低于 NK、OK-C12 和 IK-C12 (30.89%, 15.81%, 17.65%),表明 SK-C12 和 FK-C12 的无定型结构更多,更有利于水分进入复合物颗粒内部。

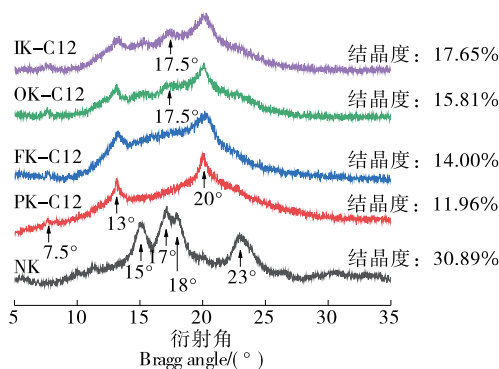


图 1 葛粉—脂肪酸复合物 X 射线衍射图谱
Figure 1 The X-ray diffraction patterns of kudzu powder-fatty acid complexes

以上结果表明,与鼓风干燥和远红外干燥相比,喷雾干燥和冷冻干燥使得葛粉-脂肪酸复合物产生了更多的无定型结构,使水分更容易进入葛粉-脂肪酸复合物颗粒内部。

2.2 微观结构

干燥方式对葛粉-脂肪酸复合物微观结构的影响如图2所示。原葛粉为不规则多面体结构。SK-C12颗粒呈椭球体状,表面布满凹陷和褶皱。这与葛粉在复合过程中发生溶胀和直链淀粉浸出有关,He等^[20]观察到的预糊化大米淀粉形态也与此相似。FK-C12颗粒呈泡沫板状,表面凹凸不平。OK-C12和IK-C12颗粒呈片状结构,表面比较平整。SK-C12和FK-C12颗粒表面这种不平整的结构,使得它们的比表面积^[21]大于OK-C12和IK-C12颗粒,这将有利于增加它们与水分接触的面积。以上结果表明,与鼓风干燥和远红外干燥相比,喷雾干燥和冷冻干燥使得葛粉-脂肪酸复合物颗粒表面更加不平整,增加了葛粉-脂肪酸复合物与水分接触的面积。

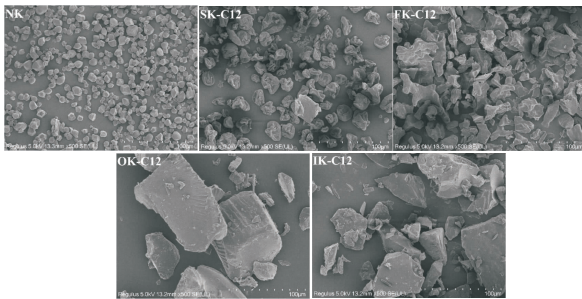


图2 葛粉-脂肪酸复合物扫描电镜图

Figure 2 Scanning electron microscopy image of kudzu powder-fatty acid complexes

2.3 堆积密度

葛粉-脂肪酸复合物堆积密度如表1所示。原葛粉的堆积密度为0.78 g/mL。SK-C12和FK-C12的堆积密度显著($P < 0.05$)低于原葛粉,分别是0.42, 0.45 g/mL。OK-C12和IK-C12的堆积密度显著($P < 0.05$)高于SK-C12和FK-C12,分别是0.88, 0.83 g/mL。说明在相同质量下,SK-C12和FK-C12的体积大于OK-C12和IK-C12,这将使SK-C12和FK-C12颗粒之间的空隙更大,有利于水分渗入。以上结果表明,与鼓风干燥和远红外干燥相比,喷雾干燥和冷冻干燥的方式使葛粉-脂肪酸复合物的堆积密度更小,有利于水分渗入到葛粉-脂肪酸复合物颗粒之间的空隙。

2.4 吸水性指数

葛粉-脂肪酸复合物的吸水性指数如表1所示。所有葛粉-脂肪酸复合物的吸水性指数都显著高于原葛粉,与葛粉-脂肪酸复合物的无定型结构比原葛粉更多

表1 葛粉-脂肪酸复合物的堆积密度、吸水性指数、膨胀势和结块率[†]

Table 1 Bulk density, water absorption index, swelling power and agglomeration rate of kudzu powder-fatty acid complexes

样品	堆积密度/ (g · mL ⁻¹)	吸水性指数	膨胀势	结块率/%
NK	0.78 ± 0.01 ^b	1.85 ± 0.02 ^a	13.44 ± 0.90 ^c	42.3 ± 1.6 ^d
SK-C12	0.42 ± 0.01 ^a	7.90 ± 0.03 ^d	9.75 ± 0.01 ^b	6.0 ± 1.1 ^a
FK-C12	0.45 ± 0.01 ^a	5.29 ± 0.10 ^c	9.35 ± 0.01 ^b	4.6 ± 0.2 ^a
OK-C12	0.88 ± 0.03 ^d	3.34 ± 0.21 ^b	6.11 ± 0.03 ^a	26.2 ± 1.9 ^c
IK-C12	0.83 ± 0.02 ^c	3.65 ± 0.10 ^b	6.46 ± 0.02 ^a	20.1 ± 2.4 ^b

[†] 同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

有关。SK-C12和FK-C12的吸水性指数(7.90, 5.29)显著高于OK-C12和IK-C12(3.34, 3.65)。这是因为与OK-C12和IK-C12相比,SK-C12和FK-C12堆积密度更小,有利于水分渗入到颗粒之间的空隙;表面更加不平整,增加了颗粒与水分接触的面积;SK-C12、FK-C12的无定型结构更多,使水分更容易进入颗粒内部。以上结果表明,与鼓风干燥和远红外干燥的方式相比,喷雾干燥和冷冻干燥的方式使葛粉-脂肪酸复合物在冲调过程中的吸水能力更强。

2.5 膨胀势

葛粉-脂肪酸复合物的膨胀势如表1所示。所有葛粉-脂肪酸复合物的膨胀势显著低于原葛粉,表明将葛粉与脂肪酸复合,能够抑制葛粉在加热时的膨胀,从而降低糊化速率,减缓凝胶网络的形成。Wang等^[7]将小麦淀粉与月桂酸、棕榈酸和硬脂酸复合后,也发现膨胀势比原小麦淀粉显著下降。SK-C12(9.75 g/g)和FK-C12(9.35 g/g)的膨胀势显著高于IK-C12(6.46 g/g)和OK-C12(6.11 g/g),表明SK-C12和FK-C12在加热过程中的膨胀能力强于OK-C12和IK-C12。以上结果表明,无论通过哪种干燥方式将葛粉与脂肪酸复合,都能抑制葛粉在加热时的膨胀。与鼓风干燥和远红外干燥的方式相比,喷雾干燥和冷冻干燥的方式使葛粉-脂肪酸复合物在加热时的膨胀能力更强。

2.6 冲调性

2.6.1 结块率和块状物显微观察 葛粉-脂肪酸复合物经(95 ± 2) °C热水直接冲调产生的块状物如图3所示。NK、SK-C12和FK-C12的白色块状物粒径较大,而OK-C12和IK-C12产生的结块粒径较小。在显微镜观察下(图4),所有样品块状物内部呈现一片黑色阴影物质,这片物质是未糊化的葛粉,而块状物边缘则是一层透明的物质,这是糊化的葛粉形成的凝胶层。这进一步验证了葛粉的结块机理^[2]。

葛粉-脂肪酸复合物经(95 ± 2) °C热水直接冲调的

结块率如表 1 所示。原葛粉的结块率是 42.3%，而葛粉—脂肪酸复合物的结块率从大到小分别是 OK-C12 (26.2%)、IK-C12 (20.1%)、SK-C12 (6.0%) 和 FK-C12 (4.6%)。结果表明葛粉—脂肪酸复合物的结块率显著低于原葛粉，这是因为将葛粉与脂肪酸复合，能够抑制葛粉在加热时的膨胀，使其在热水中无法快速形成凝胶网络，从而避免葛粉颗粒因被凝胶网络包裹而来不及充分吸水所导致的结块现象。SK-C12 和 FK-C12 的结块率显著低于 OK-C12 和 IK-C12。这是因为与 OK-C12 和 IK-C12 相比，SK-C12 和 FK-C12 在热水直接冲调时吸水能力更强，在被凝胶网络包裹前已经充分吸收水分，使得结块率降低。以上结果表明，与鼓风干燥和远红外干燥的方式相比，喷雾干燥和冷冻干燥的方式使葛粉—脂肪酸复合物的吸水能力更强，从而显著降低了结块率。SK-C12 和 FK-C12 在 $(95 \pm 2)^\circ\text{C}$ 热水直接冲调时的结块率在 6.0% 以下，比原葛粉降低了 36.3%。

2.6.2 流变性质 黏稠度是葛粉冲调后食用品质的一个重要评价指标，这个指标可以通过流变性质表征。如图 5 所示，SK-C12 和 FK-C12 黏度显著高于原葛粉，而 OK-C12 和 IK-C12 黏度低于原葛粉。表 2 是剪切应力曲线拟合结果 ($R^2 > 0.98$)，其中流体指数 n (0.32~0.72) 均小于 1，表明葛粉—脂肪酸复合物冲调液为典型的假塑性流

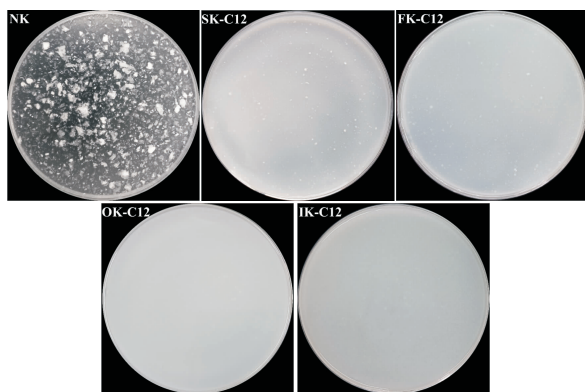


图 3 葛粉—脂肪酸复合物冲调效果图

Figure 3 Reconstituability effects of kudzu powder-fatty acid complexes

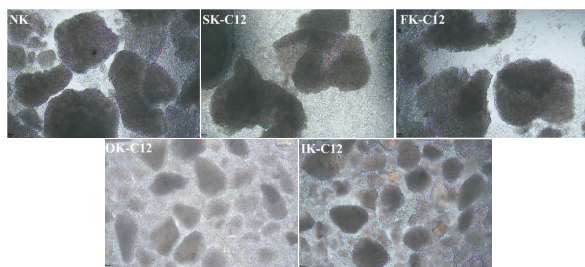


图 4 葛粉—脂肪酸复合物块状物显微图

Figure 4 Agglomeration micrographs of kudzu powder-fatty acid complexes

体^[22]。K 值从大到小分别是 SK-C12、FK-C12、NK、IK-C12、OK-C12，表明其稠度依次下降。SK-C12 和 FK-C12 的黏稠度显著高于 NK、IK-C12 和 OK-C12，这是因为 SK-C12 和 FK-C12 在冲调时结块率低，有更多的葛粉—脂肪酸复合物吸水膨胀。综上所述，与鼓风干燥和远红外干燥的方式相比，喷雾干燥和冷冻干燥的方式使葛粉—脂肪酸复合物的结块率更低，从而显著增加了黏稠度。

2.6.3 稳定性 葛粉—脂肪酸复合物冲调液的稳定系数如图 6 所示，稳定系数越接近 1，说明稳定性越好。静置 1 h 后，原葛粉、OK-C12 和 IK-C12 冲调液的稳定系数分别从 1 下降到 0.79, 0.83, 0.90，而 SK-C12 和 FK-C12 冲调液的稳定系数仍然为 1。说明在静置 1 h 内，SK-C12 和 FK-C12 冲调液稳定性最佳，且冲调液稳定性未发生变化。随后的 1~6 h 内，原葛粉冲调液的稳定系数基本保持不变，葛粉—脂肪酸复合物冲调液稳定系数开始显著下降。在 6 h 时，OK-C12 和 IK-C12 冲调液稳定系数 (0.61, 0.63) 显著低于 SK-C12 和 FK-C12 (0.91, 0.88)，这是因为 OK-C12 和 IK-C12 的黏稠度显著低于 SK-C12 和 FK-C12，导致 OK-C12 和 IK-C12 的稳定性差。以上结果表明，与鼓风干燥和远红外干燥的方式相比，喷雾干燥和冷冻干燥的方式使葛粉—脂肪酸复合物的黏稠度更高，从而显著增加了稳定性。

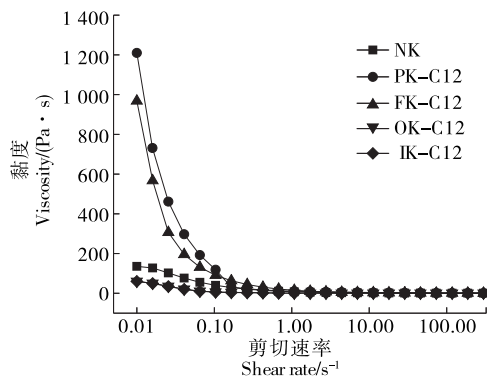


图 5 葛粉—脂肪酸复合物黏度曲线

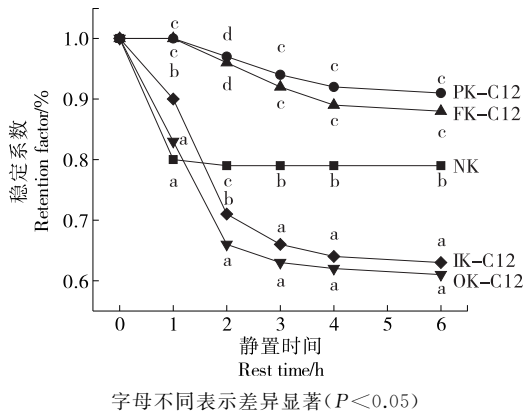
Figure 5 The viscosity curve of kudzu powder-fatty acid complexes

表 2 葛粉—脂肪酸复合物剪切应力曲线拟合结果[†]

Table 2 The fitting result of shear stress curves of kudzu powder-fatty acid complexes

样品	$K / (\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	n	R^2
NK	5.72 ± 0.05^b	0.39 ± 0.01^a	0.986 0
SK-C12	16.67 ± 0.77^d	0.32 ± 0.01^a	0.983 8
FK-C12	13.60 ± 0.27^c	0.32 ± 0.01^a	0.988 8
OK-C12	2.15 ± 0.01^a	0.72 ± 0.08^c	0.997 7
IK-C12	2.22 ± 0.04^a	0.54 ± 0.01^b	0.999 0

† 同列字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。



字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图6 葛粉-脂肪酸复合物的稳定系数

Figure 6 The stability coefficient of kudzu powder-fatty acid complexes

3 结论

将葛粉与脂肪酸复合后,葛粉冲调性被改善。改善效果与干燥方式有关。与鼓风干燥和远红外干燥的方式相比,喷雾干燥和冷冻干燥制备的葛粉-脂肪酸复合物堆积密度更小、颗粒表面更加不平整、无定型结构更多,使葛粉-脂肪酸复合物在热水直接冲调时吸水能力更强,从而更加显著地降低了结块率,提高了冲调液黏稠度和稳定性。喷雾干燥和冷冻干燥制备的葛粉-脂肪酸复合物,用 $(95 \pm 2)^\circ\text{C}$ 热水直接冲调后,结块率在 $4.6\% \sim 6.0\%$,比原葛粉降低了 36.3% 以上,黏稠度和稳定性也显著高于原葛粉,说明葛粉-脂肪酸复合物具有开发成为热水冲调即食葛粉的潜力。该研究成果可为热水冲调即食产品的制备提供试验依据,但葛粉与具有功能特性的多不饱和脂肪酸复合后,能否表现出相同的冲调性,以及其作用机制将在后续研究中进行探讨。

参考文献

- [1] ZHAO Y G, ZHU X Y, FANG Y P. Structure, properties and applications of kudzu starch [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 119 (2): 106817.
- [2] WU J Y, XU S Q, HUANG Y, et al. Prevents kudzu starch from agglomeration during rapid pasting with hot water by a non-destructive superheated steam treatment[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132819.
- [3] WANG H Q, WU J Y, LUO S J, et al. Improving instant properties of kudzu powder by extrusion treatment and its related mechanism[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 101: 105475.
- [4] 于冰垚. 改善葛粉制品冲调性的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2016: 5-10.
YU Bin-yao. Study on improve the reconstitutibility of puerariae radix starch products[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2016: 5-10.
- [5] 周先汉, 张莉, 欧杰. 速溶即食葛粉酶法工艺及优化[J]. 食品科学, 2005(8): 238-241.
ZHOU Xian-han, ZHANG Li, OU Jie. Optimization of the technology for the enzyme processing of the instant edible kudzu powder[J]. Food Science, 2005(8): 238-241.
- [6] YAN X X, KOU L H, WEI H Y, et al. Effect of fatty acid addition on properties of amylose nanoparticles prepared via complexing and precipitation[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 145: 112097.
- [7] WANG S J, WANG J R, YU J L, et al. Effect of fatty acids on functional properties of normal wheat and waxy wheat starches: A structural basis[J]. Food Chemistry, 2016, 190: 285-292.
- [8] LI L, LIU Z D, ZHANG W H, et al. Production and applications of amylose-lipid complexes as resistant starch: Recent approaches[J]. Starch-Stärke, 2021, 73: 2000249.
- [9] 常丰丹. 颗粒态淀粉脂质复合物的制备、理化性质及其形成机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015: 96-107.
CHANG Feng-dan. Preparation, properties, and mechanism of granular starch-lipid complex[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015: 96-107.
- [10] AHMED J, THOMAS L, KHASHAWI R. Influence of hot-air drying and freeze-drying on functional, rheological, structural and dielectric properties of green banana flour and dispersions[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105331.
- [11] DUECK C, CENKOWSKI S, IZYDORCZYK M S. Effects of drying methods (hot air, microwave, and superheated steam) on physicochemical and nutritional properties of bulgur prepared from high-amylose and waxy hull-less barley[J]. Cereal Chemistry, 2020, 97(2): 483-495.
- [12] NARA S, KOMIYA T J S S. Studies on the relationship between water-saturated state and crystallinity by the diffraction method for moistened potato starch[J]. Starch-Stärke, 1983, 35(12): 407-410.
- [13] ZHANG Y J, ZHU K X, HE S Z, et al. Characterizations of high purity starches isolated from five different jackfruit cultivars[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 785-794.
- [14] 何兴芬, 杨富民, 张明霞, 等. 藜麦南瓜复合粉配方的优化[J]. 现代食品科技, 2019, 35(4): 209-216.
HE Xing-fen, YANG Fu-min, ZHANG Ming-xia, et al. Optimization of quinoa and pumpkin compound powder formula[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(4): 209-216.
- [15] 黄琪, 黄钰斐, 梁倩铤. 不同溶剂对大米淀粉-脂质复合物性质的影响[J]. 粮食科技与经济, 2020, 45(12): 75-76.
HUANG Qi, HUANG Yu-fei, LIANG Qian-xi. Effect of different solvents on the properties of rice starch-lipid complexes[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2020, 45(12): 75-76.
- [16] 孙玉清, 罗红霞, 孙爱东, 等. 紫甘薯全粉冲调性研究[J]. 食品工业, 2015, 36(5): 70-73.
SUN Yu-qing, LUO Hong-xia, SUN Ai-dong, et al. Study on the dispersality of purple sweet potato powder[J]. The Food Industry, 2015, 36(5): 70-73.

(下转第 136 页)