油炸过程中淀粉的颗粒形貌、结晶度与热力学特性变化

张令文[1,2]，计红芳[1]，娄世垚[1]，马汉军[1]，杨铭铎[2]
（1.河南科技学院食品学院，河南新乡 453003）
（2.哈尔滨商业大学中式快餐研发中心博士后科研基地，黑龙江哈尔滨 150076）

摘要：采用深层油炸模型，利用扫描电镜分析、差示扫描量热分析和 x-射线衍射分析等现代仪器分析方法，研究了油炸过程中淀粉的颗粒形貌、结晶结构和热力学性质的变化规律。SEM 分析表明，随着油炸温度的增加和时间的延长，淀粉颗粒形态发生了明显变化。在初炸时，淀粉颗粒逐渐膨胀；随着复炸的进行，淀粉颗粒崩解，相互靠近，融合形成大块的团聚体。同时，也导致了淀粉的碘蓝值逐渐减少。DSC 测定结果表明，当初炸 25 s 和 50 s 时，淀粉分子发生了一定程度的糊化作用；当初炸 75 s 和 100 s 时，淀粉完全糊化；当复炸超过 20 s 时，淀粉在油炸过程中形成了淀粉-脂质复合物。X-射线衍射分析显示，当初炸超过 75 s 后，淀粉的结晶度均高于初炸 25 s 淀粉的结晶度；复炸 40 s 后淀粉的结晶度随油炸时间的延长而降低。

关键词：淀粉；油炸；颗粒形貌；结晶度；热力学特性
文章篇号：1673-9078(2015)5-36-42 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.5.007

Changes in Morphological Characteristics, Crystallinity, and Thermodynamic Properties of Starches during Deep-fat Frying

ZHANG Ling-wen[1,2], JI Hong-fang[1], LOU Shi-yao[1], MA Han-jun[1], YANG Ming-duo[2]
(1.School of Food Science, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)
(2.Postdoctoral Research Base of The Chinese Fast Food Research and Development Center, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China)

Abstract: A deep-fat-frying (DFF) model was employed to study the changes in morphological characteristics, crystal structure, and thermodynamic characteristics of starches during the DFF process using advanced analytical methods, including scanning electron microscopy (SEM), differential scanning calorimetry (DSC), and X-ray diffractometry (XRD). The SEM results indicated that there were significant changes in the morphological characteristics of starch granules with increasing frying temperature and time. During the initial frying, the granules expanded. As frying proceeded, the starch granules disintegrated, moved close to each other, and ultimately merged to form large aggregates. Simultaneously, the iodine blue value of starch decreased gradually. The DSC results showed that a certain degree of gelatinization occurred in starch molecules during the first 25 s and 50 s of initial frying; the starch was completely gelatinized after 75 s and 100 s of initial frying, and an amylose-lipid complex was formed after 20 s of repeated frying. XRD indicated that after 75 s of initial frying, the degree of crystallinity of the starch was higher than that after 25 s of initial frying. After 40 s of repeated frying, the crystallinity of starch decreased with frying time.

Key words: starch; frying; granule morphology; crystallinity; thermodynamic properties

挂糊油炸食品具有色泽金黄，外脆里嫩的特点，深受人们喜爱[1]。挂糊是油炸挂糊类食品重要的加工工序之一[2]。最简单的糊由面粉和水组成，糊的组成成分对油炸食品品质的影响引起了国内外学者的广泛关注[3~5]。淀粉和变性淀粉作为糊的组分之一，可用于提高糊的流变特性[6~9]，降低油炸食品的含油量[10]。高直链玉米淀粉、玉米淀粉、蜡质玉米淀粉、预糊化木薯淀粉对深层油炸鸡肉块品质的影响研究表明，糊中添加淀粉后可增加产品的脆度。Sanz et al.探讨了抗性淀粉 R3 对挂糊油炸鱿鱼圈的功能特性及适应性的

收稿日期：2014-11-03
基金项目：河南省科技厅科技攻关项目(142102110040)；河南省高校科技创新团队支持计划项目(13IRTSTHN006)；黑龙江省青年科学基金项目(QC2011C093)；河南科技学院大学生创新训练计划项目(2013CX053)
作者简介：张令文（1977-），男，博士，副教授，研究方向为传统食品技术机理
通讯作者：杨铭铎（1956-），男，教授，博士生导师，研究方向为传统食品工业化及技术

影响，结果发现，抗性淀粉的添加显著提高产品外壳的硬度和酥脆性，表面的金黄色也较好；当抗性淀粉添加量高达 20%时，消费者仍能接受所制得的产品[11]。Primo-Martín 研究了不同交联度的小麦淀粉对油炸挂糊食品脆度的影响表明，随着小麦淀粉交联度的增加，油炸食品的脆性得到了改善[12]。

油炸是一个十分复杂而又非常重要的操作单元，被广泛用于家庭烹饪和食品工业生产。油作为常用的传热介质之一，具有加热均匀、传热速度快等优点，能够使终产品具有良好的色泽、形状和口感。在油炸过程中，由于食品与油脂之间的相互作用，使油炸食品的理化特性、感官品质等均发生了明显变化[13]。油炸食品产品品质及贮藏过程中食用品质的变化重要因素之一就是在油炸过程中淀粉特性的变化。

国内外学者仅对油炸处理前后的大米淀粉和玉米淀粉的部分理化性质的研究有过报道[14~15]，而对油炸过程中淀粉的颗粒形貌、结晶度和热力学特性的变化规律的研究鲜见文献报道。本课题组在前期研究的基础上[1, 16~19]，开展了油炸过程中淀粉部分结构和功能特性的变化规律研究，不仅对淀粉科学的基础研究，而且对淀粉在油炸食品领域的应用研究均有重要意义。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

食盐，中盐皓龙盐化有限责任公司；双效泡打粉，安琪酵母股份有限公司；玉米胚芽油，益海嘉里食品营销有限公司；猪后腿肉，河南双汇集团；面粉（特一粉） 郑州金苑面业有限公司；南绿 2 号绿豆淀粉，本实验室自制；其他试剂，均为国产分析纯。

1.2 主要仪器设备

HH-4 数显恒温水浴锅，金坛市城东光芒仪器厂；101-2A 电热鼓风干燥箱，天津市通利信达仪器厂；HM4400 多功能搅拌器，Caple 公司；BSA124S 电子天平，赛多利斯科学仪器有限公司；DL-5-8 离心机，上海安亭科学仪器厂；KQ-200VDV 超声波清洗器，昆山市超声仪器有限公司；Lambda 35 紫外/可见分光光度计，美国 PerkinElmer 公司；D8 AdanceX-射线衍射仪，德国 Bruker 公司；Quanta 200 型扫描电镜，美国 FEI 公司；STA449C 示差扫描量热仪，德国 NETZSCH 公司；RRH-200 型万能高速粉碎机，欧凯莱芙（香港）宝业公司；油炸锅 EF-101 不锈钢单缸电炸炉（改制了温度控制装置），广州威而宝酒店设备有限公司；深层油炸模型，自制。

1.3 试验方法

1.3.1 挂糊油炸工艺流程

猪肉粒

↓

面粉、淀粉、泡打粉、食盐→混匀→加水制糊→油炸模型→入锅油炸→指标测定

1.3.2 糊的制备

按表1配方配制糊。在加水搅拌前，将面粉、南绿2号绿豆淀粉、泡打粉、盐混合均匀，以免在加水搅打成糊时不均匀。在搅拌器中，用1档搅拌3 min，室温下（25 ℃）静置1 h，备用（使用前将糊用搅拌器1档搅拌1 min，混匀后立即使用）。

表 1 面糊的配方（g）

Table 1 Components of the batter (g)

面粉添加量	淀粉添加量	泡打粉量	食盐添加量	水添加量
6	4	0.1	0.15	13

1.3.3 深层油炸模型

深层油炸模型采用张令文等[1,19]的方法。

1.3.4 油炸条件

1.3.4.1 第一次油炸（初炸）

准确称取 5g 猪肉粒置于铝盒中；用移液枪准确移取 5 mL 按 1.3.2 制备的糊，转移至不锈钢纱网上，静置 2 min。将模型放入 180℃的玉米胚芽油中分别油炸 25、50、75、100 s，沥油，室温冷却 5 min 后，分离外壳，按 1.3.5 法制备淀粉，测定淀粉样品的颗粒形貌、结晶度和热力学参数等相关指标。

1.3.4.2 第二次油炸（复炸）

准确称取 5 g 猪肉粒置于铝盒中；用移液枪准确移取 5 mL 按 1.3.2 制备的糊，转移至不锈钢纱网上，静置 2 min。将模型放入 180 ℃玉米胚芽油中油炸 100 s 捞出、沥油，将油升至 200 ℃，室温冷却 11 min 后，再次油炸 20、40、60、80 s。室温冷却 5 min 后，分离外壳，按 1.3.5 法制备淀粉，测定淀粉样品颗粒形貌、结晶度和热力学参数。

1.3.5 淀粉的制备

采用周静舫的方法并稍作修改[14]。简要步骤如下：

取适量外壳→0.4% NaOH 浸泡 24 h（固液比=1:15，*m/V*，在 12 h 时，用玻璃棒搅拌）→匀浆（先 3 min+后 3 min）→1.0 mol/L HCl 将上述匀浆液中和至 pH6.5→过 100 目筛→筛下物（溶液）静置 2 h 后，去除上清液→去离子水将沉淀制成悬浆（5 倍体积，以原始外壳为基础）→4000 r/min 离心 15 min（1 次）→取沉淀→去离子水将沉淀制成悬浆（5 倍体积，以原始

外壳为基础）→4000 r/min 离心 15 min（2 次）→去离子水将沉淀制成悬浆（5 倍体积，以原始外壳为基础）→ 4000 r/min 离心 15 min（3 次）→沉淀转移到干燥皿→ 40 ℃鼓风干燥 48 h→索氏提取（石油醚沸程 30~60 ℃，50 ℃ 6 h）→ 40 ℃鼓风干燥 6 h→粉碎后过 100 目筛→密封冷藏备用

1.3.6 淀粉的颗粒形态观察

采用 Quanta 200 型扫描电镜（FEI，美国）进行颗粒形貌观察。把双面胶固定在样品台上，取稍许淀粉均匀地洒在双面胶上，然后喷金处理。将淀粉保存于干燥器中，经短暂干燥后，在操作电压 15 kv 下观察淀粉的形态，并拍摄具有代表性的淀粉颗粒形貌。

1.3.7 淀粉的碘蓝值测定

采用蔡一霞等的方法，并稍作修改[20]。准确称取 0.1 g 淀粉样品（干基），使用 1.0 mL 无水乙醇将样品湿润后，加入 10 mL1.0 mol/L NaOH 溶液后，置于沸水浴中加热 10 min，冷却后定容至 100 mL，混匀即为淀粉样品溶液。移取 1.4 mL 淀粉样品溶液于 50 mL 容量瓶，依次加入 4 mL 0.09 mol/L NaOH 溶液、0.48 mL 1 mol/L 的乙酸和 0.8 mL 1 mol/L 碘试剂，用蒸馏水定容至 50 mL，混匀后 10 min，于 620 nm 处测吸光度，吸光度即为碘蓝值。空白用 0.7 mL 蒸馏水加入 2 mL 0.09 mol/L NaOH 溶液、0.4 mL 1 mol/L 乙酸和 0.4 mL1 mol/L 的碘试剂定容至 50 mL。

1.3.8 淀粉颗粒晶体类型测定

采用德国 Bruker 公司 D8 AdanceX-射线衍射仪进行测定。将充分进行水分平衡的淀粉样品（在相对湿度 100%的环境中平衡 72 h）紧密的充填到塑料磨具（直径 20 mm，深 1.5 mm）中，放在 X-射线下进行测定。测试电压 40kV、测试电流 40 mA。扫描条件为：扫描 2θ 范围为 4~45°，步长为 0.02，扫描速率为 3°/min。结晶度根据 Cheetham 的方法计算[21]。

1.3.9 淀粉热力学特性测定

采用 STA449C 示差扫描量热仪（NETZSCH 公司，德国）进行测定。准确称取 2.5 mg 淀粉样品（干基）加入到铝制密封坩埚中，放入 25 μL 去离子水在 TA 密封磨具中用其配套铝盖密封后，在室温下平衡过夜。升温速率为 5 ℃/min，升温起始温度为 25 ℃，终止温度为 125 ℃，记录升温过程的 DSC 曲线。保护气为氮气，流速为 60 mL/min。每个样品平行 3 次，取平均值。同时记录胶凝起始温度（T_o）、峰值温度（T_p）、终止温度（T_c）和胶凝焓变（ΔH）。

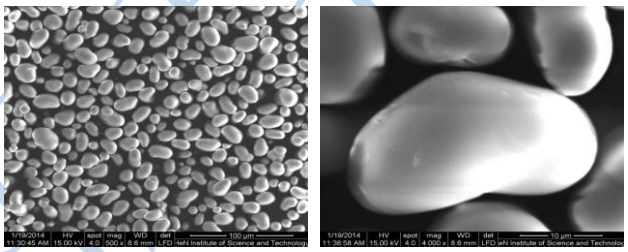
1.3.10 数据处理

采用 Excel 计算整理数据，采用 SPSS 13.0 进行方差分析。

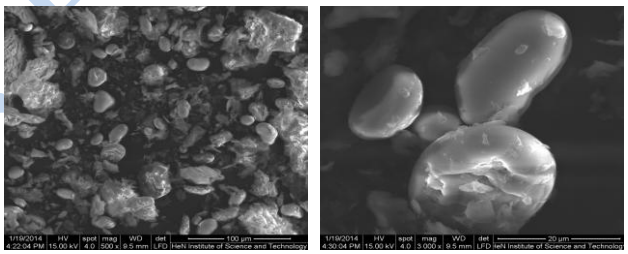
2 结果与讨论

2.1 油炸过程中淀粉颗粒形貌的变化

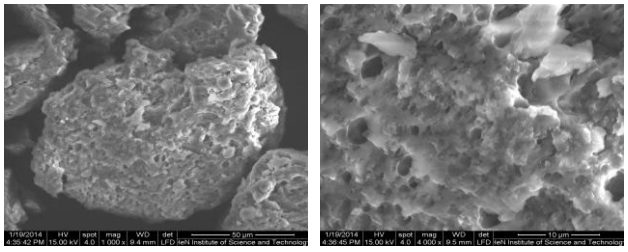
不同植物来源的原淀粉立体形貌不同，绿豆原淀粉较大的颗粒呈肾形，部分较小的颗粒呈卵形，颗粒表面光滑（图1a）；这与文献报道一致[22~23]。当初炸 25 s时，尚有部分淀粉颗粒保持原貌（图1b）；当初炸在50~100 s之间时，淀粉颗粒逐渐膨胀、部分发生崩解（图1c，d，e）；随着复炸的进行，淀粉颗粒发生崩解，相互靠近，重新融合并形成较大的团聚体；淀粉颗粒进一步变大，表面伴随碎片剥落（图1f，g，h，i）。试验结果表明，随着油炸温度的增加和时间的延长，淀粉颗粒形态发生了明显的变化。淀粉粒形态变化必将引起淀粉应用性质的变化，这对于研究淀粉在油炸条件下的理化性能和加工利用具有指导意义。



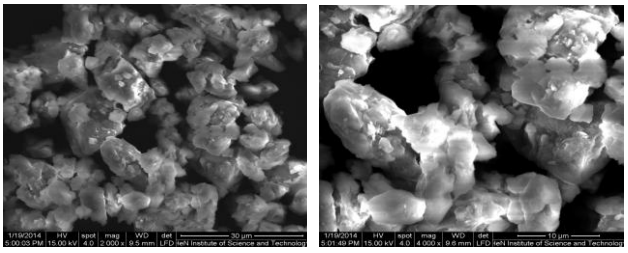
(a) 南绿2号绿豆原淀粉



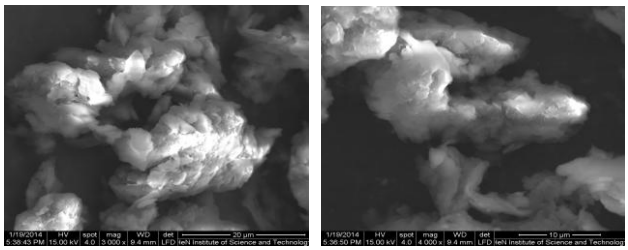
(b) 初炸25s



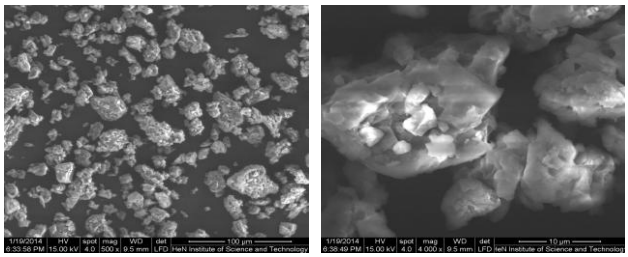
(c) 初炸50s



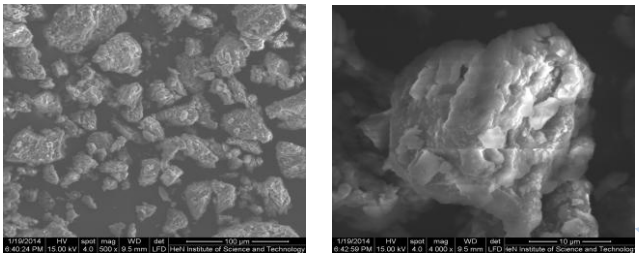
(d) 初炸75s



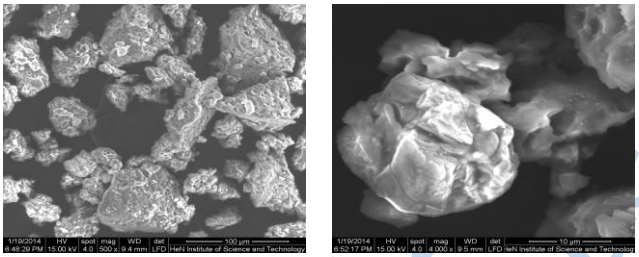
(e) 初炸100s



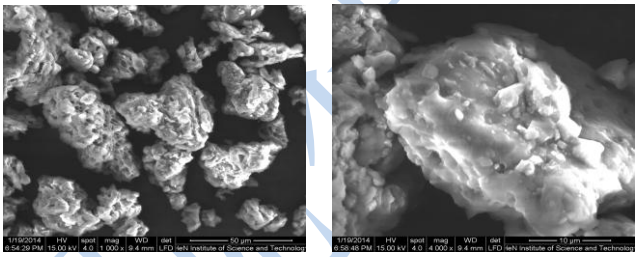
(f) 复炸20s



(g) 复炸40s



(h) 复炸60s



(i) 复炸80s

图 1 不同油炸处理的淀粉扫描电镜图

Fig.1 Scanning electron micrographs of starches with different frying treatments

2.2 油炸过程中淀粉碘蓝值的变化

碘与淀粉结合形成淀粉-碘复合物，该复合物可以发生显色反应，直链淀粉为蓝色，支链淀粉为紫红色，其中蓝色的深浅与直链淀粉含量有关。随着油炸温度的升高和油炸时间的增加，淀粉的碘蓝值（即吸光度）逐渐减少。初炸25~50 s之间时，淀粉的碘蓝值下降速度较缓慢；初炸75 s以后，淀粉碘蓝值下降速度较快。初炸淀粉的碘蓝值显著高于复炸淀粉的碘蓝值（$p<0.05$）。初炸25 s时，淀粉碘蓝值为0.419；而复炸80 s时，淀粉碘蓝值仅为0.271，两者相比差异极显著（$p<0.01$）（图2）。周静舫研究了油炸对大米淀粉特性的影响，也得到了类似结论，淀粉经油炸处理后，碘蓝值大大降低[14]。艾志录等在研究棕榈酸、油酸对糯米淀粉特性的影响时，也发现了类似的结论，脂肪酸用量的增加会导致淀粉的吸光度显著降低[15]。谢涛和张儒报道较高的温度有利于锥栗直链淀粉－脂肪酸复合物的形成与稳定[24]，从而引起淀粉蓝值的减少的结论也本研究结果相一致。随着油炸温度的升高和油炸时间的延长，淀粉分子与油脂的脂肪酸分子结合的几率增加，这可能会使更多的脂肪酸分子与淀粉形成复合物，淀粉-脂质复合物的量相应增加，导致淀粉结合碘的几率减少，进而使淀粉的碘蓝值降低。

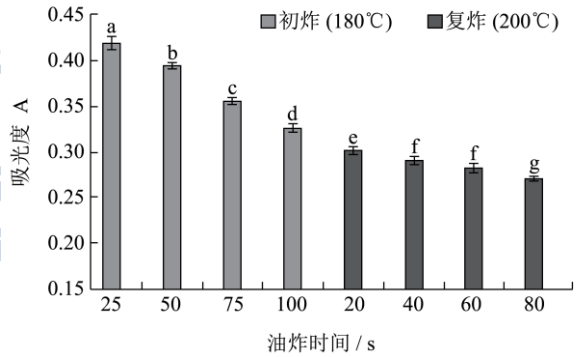


图 2 不同油炸处理的淀粉碘蓝值

Fig.2 Iodine blue values of the starches with different frying treatments

注：有相同字母者差异不显著（$p>0.05$），反之差异显著（$p<0.05$）。

2.3 油炸过程中淀粉结晶结构的变化

由小麦和绿豆原淀粉的 X-射线衍射图谱可知，它们均是由尖峰衍射特征和弥散衍射特征两部分组成，是典型的多晶体系的衍射曲线，说明原淀粉颗粒是由结晶和非结晶两部分组成。小麦原淀粉是典型的 A 型图谱，峰形尖锐，具有较高的结晶度，在 X-射线图谱上的特征峰对应的 2θ 值分别为 15.19°，17. 18°，18.07° 和 23.02°；绿豆原淀粉是典型的 C 型图谱，峰形尖锐，同样具有较高的结晶度，其对应的特征峰 2θ 值分别为 15.27°，17. 22° 和 23.18°。油炸后糊中淀粉的 X-射线衍射图谱中特征峰的位置和强度发生了不同程度的变化。随着油炸时间的延长，淀粉均在 2θ 为 20° 附近出现不同强度的衍射峰。当初炸 75 s 和 100 s 及复炸时，淀粉的 X-射线衍射图 谱中均在 31.70° 2θ 附近出现了

新的强吸收峰，但尖峰强度差别较大：当初炸 75s 时，淀粉在 31.72° 2θ 的尖峰强度仅为 1142 cps；当初炸 100 s，淀粉在 31.78° 2θ 的尖峰强度增至 1444 cps；而复炸 20 s 时，淀粉也是在 31.78° 2θ 有强吸收，尖峰强度迅速增值 4977cps；当复炸 40s 时，淀粉在 31.76° 2θ 处的尖峰吸收达最高值（5658 cps）；当复炸超过 40 s 后，淀粉在 31.70° 2θ 处的尖峰强度明显降低。在 31.70° 2θ 附近出现的不同强度的衍射峰，表明了淀粉在油炸过程中的结晶结构发生了变化（图 3）。当初炸时间超过 75 s 后，淀粉的结晶度均高于初炸 25 s 时淀粉的结晶度，复炸 40 s 后其淀粉的结晶度随处理时间的延长而降低（表 2）。这可能是由于直链淀粉的螺旋结构内部非极性区域与脂肪酸尾部的碳链之间形成单螺旋包接结构，随着油炸处理时间的延长，这种包接结构形成的机率就越大，淀粉-脂质复合物的复合率也就越高，但结晶度反而降低[25~27]。

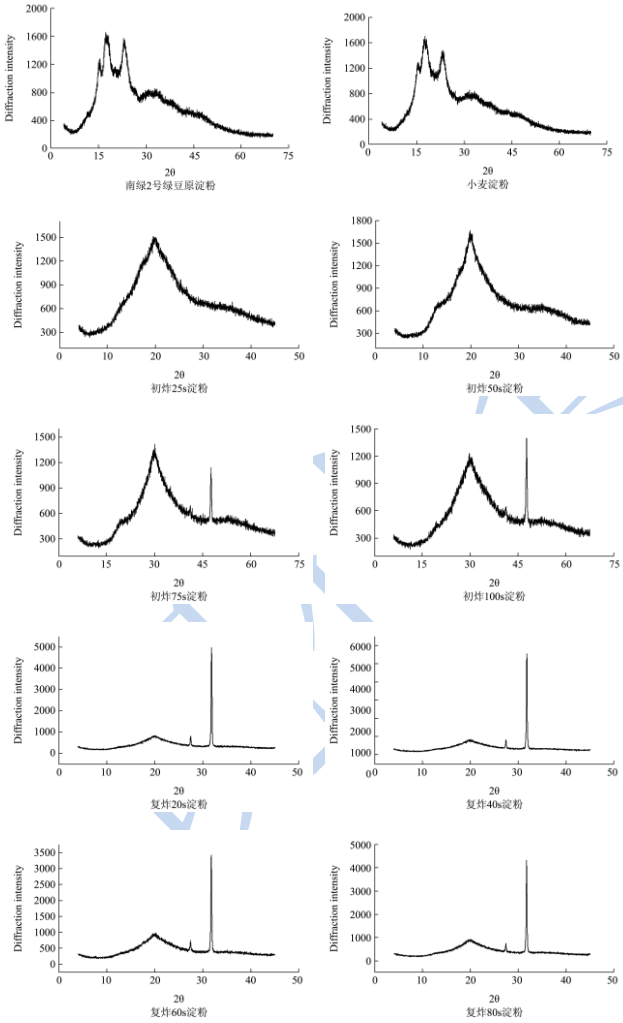


图 3 不同油炸处理的淀粉 X-射线衍射图谱

Fig.3 X-ray diffraction patterns of the starches with different frying treatments

2.4 油炸过程中淀粉热力学特性的变化

油炸过程中淀粉的热力学参数见表3，代表性的热力学曲线见图4。初炸25 s时，淀粉的胶凝起始温度为74.2 ℃，峰值温度为75.1 ℃，终止温度为81.6 ℃，胶凝焓变为1.32 J/g；初炸50 s时，其胶凝起始温度降为70.1 ℃，峰值温度为70.3 ℃，终止温度为78.2 ℃，胶凝焓变仅为0.55 J/g。当初炸时间增至75 s和100 s时，糊中淀粉的DSC曲线没有糊化吸热峰出现（表2）。试验结果表明，淀粉在油炸过程中发生了不同程度的糊化；当初炸时间为25 s和50 s时，糊中的淀粉分子结构发生改变，氢键和结晶区发生断裂，产生了一定程度的糊化作用，当初炸时间为75 s和100 s时，淀粉完全糊化，因此在60~80 ℃之间没有糊化吸热峰出现。Sakonidou et al.指出加热可以破坏淀粉颗粒之间的氢键，使淀粉分子膨胀，并最终导致淀粉颗粒破裂，使得淀粉易于糊化[28]。

当复炸时间超过20 s时，淀粉的DSC曲线在60~80 ℃之间没有糊化吸热峰出现，这表明复炸过程中淀粉发生了糊化；在100~140 ℃均有熔融吸热峰出现，这表明糊中淀粉在复炸过程中形成了淀粉-脂类复合物[29]。复炸糊中的淀粉胶凝起始温度、胶凝峰值温度及胶凝最终温度均高于初炸25 s的淀粉样品，并且随着复炸时间的延长，上述胶凝起始温度、峰值温度及最终温度均增加（表2）。周静舫研究油炸前后大米淀粉的DSC特性时，也发现了类似的结论，油炸大米淀粉的晶体熔融起始温度较原淀粉推迟了24.4 ℃，起始温度出现在95.6 ℃，峰值温度在124.4 ℃，终止温度在147.6 ℃，吸热焓值高达795.3 J/g[14]。上述现象可能主要是由于部分直链淀粉与脂质形成的复合物抑制了淀粉颗粒的膨胀，使得糊化温度增加[30]。

表 2 不同油炸处理的淀粉相对结晶度和热力学性质

Table 2 The relative crystallinity and thermal properties of starch from crusts treated with different frying

处理条件	相对结晶度/%	T_o/℃	T_p/℃	T_c/℃	ΔH/(J/g)
初炸 25s	2.29	74.2±0.1^{e}	75.1±0.0^{e}	81.6±0.0^{e}	1.32±0.06^{b}
初炸 50s	0.97	70.1±0.1^{f}	70.3±0.0^{f}	78.2±0.0^{f}	0.55±0.01^{d}
初炸 75s	5.86	–	–	–	–
初炸 100s	8.33	–	–	–	–
复炸 20s	17.53	77.3±0.1^{d}	101.0±0.1^{c}	101.4±0.1^{d}	1.06±0.02^{c}
复炸 40s	19.48	97.5±0.1^{c}	102.7±0.1^{b}	105.3±0.0^{c}	12.80±0.10^{a}
复炸 60s	19.25	99.8±0.1^{b}	100.0±0.1^{d}	109.0±0.1^{b}	1.02±0.03^{c}
复炸 80s	15.11	121.0±0.1^{a}	127.5±0.1^{a}	132.0±0.1^{a}	0.41±0.02^{e}

注：同列间相比，有相同字母者差异不显著（p>0.05），反之差异显著（p<0.05）。

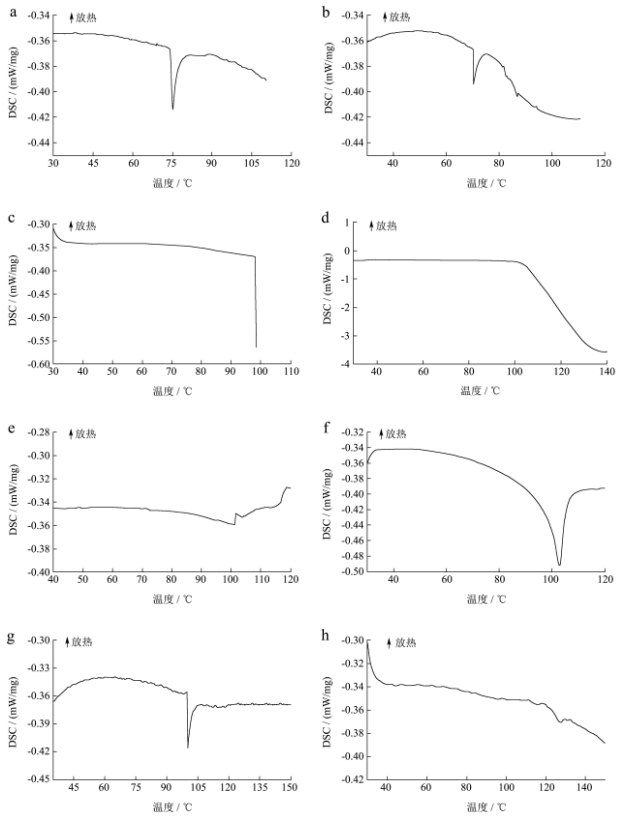


图 4 不同油炸处理淀粉的热力学曲线

Fig.4 Differential scanning calorimetry curves of the starches with different frying treatments

注：(a) 初炸 25s，(b) 初炸 50s，(c) 初炸 75s，(d) 初炸 100s，(e) 复炸 20s，(f) 复炸 40s，(g) 复炸 60s，(h) 复炸 80s。

3 结论

3.1 随油炸温度的升高和时间的延长，淀粉颗粒发生了明显的变化；淀粉的碘蓝值（即吸光度）逐渐减少，初炸淀粉碘蓝值显著高于复炸淀粉碘蓝值。

3.2 油炸淀粉的 X-射线图谱特征峰位置和强度发生了不同程度的变化。油炸处理的淀粉均在 2θ 为 20^o 附近出现不同强度的衍射峰；当初炸时间超过 75 s 后，淀粉的结晶度均高于初炸 25 s 的淀粉的结晶度；初炸 100 s 和复炸 40s 后淀粉结晶度随处理时间的延长而降低。

3.3 淀粉在油炸过程中发生了不同程度的糊化。复炸淀粉的胶凝起始温度、胶凝峰值温度及胶凝最终温度均高于初炸 25 s 的淀粉样品。

参考文献

[1] 张令文,杨铭铎,计红芳,等.淀粉对油炸挂糊猪肉片品质的影响[J].食品工业科技,2013,34(8):114-117
ZHANG Ling-wen, YANG Ming-duo, JI Hong-fang, et al. Effect of starches on the quality of deep-fried battered pork slices [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(8): 114-117

[2] 杨铭铎.中式烹调师培训教材[M].哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1995
YANG Ming-duo. Training materials for chinese cooking division [M]. Harbin: Heilongjiang Science & Technology Press, 1995

[3] Dogan S F, Sahin S, Sumnu G. Effects of soy and rice flour addition on batter rheology and quality of deep fat-fried chicken nuggets [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 71: 127-132

[4] Nasiri F D, Mohebbi M, Yazdi F T, et al. Effects of soy and corn flour addition on batter rheology and quality of deep fat-fried shrimp nuggets [J]. Food Bioprocess Technology, 2012, 5(4): 1238-1245

[5] Primo-Martin C, Sanz T, Steringa D W, et al. Performance of cellulose derivatives in deep-fried battered snacks: oil barrier and crispy properties [J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24: 702-708

[6] Fiszman S, Salvador A. Recent developments in coating batters [J]. Trends in Food Science and Technology, 2003, 14: 399-407

[7] Miyazaki M, Van Hunga P, Maeda T, et al. Recent advances in application of modified starches for bread making [J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17: 591-599

[8] Wang Y, Zhang M, Mujumdar A S. Effect of cassava starch gel, fish gel and mixed gels and thermal treatment on structure development and various quality parameters in microwave vacuum-dried gel slices [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 33(1): 26-37

[9] Pongjaruvat W, Methacanon P, Seetapan N, et al. Influence of pregelatinised tapioca starch and transglutaminase on dough rheology and quality of gluten-free jasmine rice breads [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 36: 143-150

[10] Ahamed N T, Singhal R S, Kulkarmi P R, et al. Deep-fat fried snacks from blends of soy flour and corn, amaranth and chenopodium starches [J]. Food Chemistry, 1997, 58: 313-317

[11] Sanz T, Salvador A, Fiszman S M. Resistant starch (RS) in battered fried products: Functionality and high-fibre benefit [J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22: 543-549

[12] Primo-Martin C. Cross-linking of wheat starch improves the crispness of deep-fried battered food [J]. Food Hydrocolloids, 2012, 28: 53-58

[13] Jan Pokorny, Zuzana Reblova. Effect of food components on changes in frying oil [J]. Food Technology and Biotechnology, 1999, 37(2): 139-143

[14] 周静舫.面窝加工工艺参数优化及油炸对大米淀粉特性影响研究[D].华中农业大学,2008
ZHOU Jing-fang. Study on processing technology optimization of fried cake and effects of deep-fried on rice starch properties [D]. Huazhong Agricultural University, 2008

[15] 艾志录,陈迪,谢新华,等.棕榈酸 油酸对糯米淀粉热特性的影响[J].食品科学,2013,34(21):20-23
AI Zhi-lu, CHEN Di, XIE Xin-hua, et al. Effect of palmitic acid and oleic acid on thermal properties of waxy rice starch [J]. Food Science, 2013, 34(21): 20-23

[16] Zhang L W, Yang M D, Ji H F, et al. Some physicochemical properties of starches and their influence on color, texture, and oil content in crusts using a deep-fat-fried model [J]. CyTA-Journal of Food, 2014, 12(4): 347-354

[17] Zhang L W, Ji H F, Yang M D, et al. Effects of high hydrostatic pressure treated mung bean starch on characteristics of batters and crusts from deep-fried pork nuggets [J]. International Journal of Food Engineering, 2014, 10(2): 261-268

[18] 张令文,计红芳,杨铭铎等.大米粉对油炸挂糊食品外壳食用品质的影响[J].食品工业科技,2014,35(9):87-90
ZHANG Ling-wen, JI Hong-fang, YANG Ming-duo, et al. Effect of rice flour on edible quality of crusts from deep-fat-fried battered food [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(9): 87-90

[19] 计红芳,张令文,马汉军,等.一种深层油炸模型:中国,CN203851697U[P]2014.10.1.http://www.pss-system.gov.cn/sipopublicsearch/search/search/showViewList.shtml
JI Hong-fang, ZHANG Ling-wen, MA Han-jun, et al. One Kind of Deep-fat-fried Model: China, CN203851697U [P] 2014.10.1. http://www.pss-system.gov.cn/sipopublicsearch/search/ search/showViewList.shtml

[20] 蔡一霞,王维,朱智伟等.不同类型水稻支链淀粉理化特性及其与米粉糊化特征的关系[J].中国农业科学, 2006, 39(6): 1122-1129
CAI Yi-xia, WANG Wei, ZHU Zhi-wei, et al. The physiochemical characteristics of amylopectin and their relationships to pasting properties of rice flour in different varieties [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(6): 1122-1129

[21] Cheetham N W H, Tao L P. Variation in crystallinet type with amylose content in maize starch granules [J]. Carbohydrate Polymers, 1998, 36: 277-284

[22] 王绍清,王琳琳,范文浩,等.扫描电镜法分析常见可食用淀粉颗粒的超微形貌[J].食品科学,2011,32(15):74-79
WANG Shao-qing, WANG Lin-lin, Fan Wen-hao., et al. Morphological analysis of common edible starch granules by scanning electron microscopy [J]. Food Science, 2011, 32(15): 74-79

[23] Li S, Ward R, Gao Q. Effect of heat-moisture treatment on the formation and physicochemical properties of resistant starch from mung bean (Phaseolus radiatus) starch [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25: 1702-1709

[24] 谢涛,张儒.锥栗直链淀粉-脂肪酸复合物的结构特性[J].中国粮油学报,2012,27(5):31-3
XIE Tao, ZHANG Ru. Structural properties of Castanea henryi amylose-fatty acid complexes [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(5): 31-33

[25] Bail P L, Rondeau C. Structural investigation of amylose complexes with small ligands: helical conformation, crystalline structure and thermostability [J]. Journal of Biological Macromolecules, 2005, 35: 1-7

[26] Uri L, Shahar H C, Yizhak S, et al. Effects of long chain fatty acid unsaturation on the structure and controlled release properties of amylose complexes [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(3): 667-675

[27] Tufvessen F, Wahlgren M, Eliasson A C. Formation of amylose-lipid complexes and effects of temperature treatment: Part 1. Monoglycerides [J]. Starch, 2003, 55(2): 627-632

[28] Sakonidou E P, Karapantsios T D, Raphaelides S N. Mass transfer limitations during starch gelatinization [J]. Carbohydrate Polymers, 2003, 53(1): 53-61

[29] 马成业,李宏军,陈善峰等.脱胚玉米和淀粉挤出物中淀粉-脂热特性分析[J].中国粮油学报,2013,28(7):23-28
MA Cheng-ye, LI Hong-jun, CHEN Shan-feng, et al. DSC Analysis of starch-lipids complex in extruded corn starch of degermed corn [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(7): 23-28

[30] Morrison W R, Law R V, Snape C E. Evidence for inclusion complexes of lipids with v-amylose in maize, rice and oat starches [J]. Journal of Cereal Science, 1993, 18: 107