马铃薯淀粉介电处理理化性质研究

夏天雨， 江 昊， 苟 敏， 申慧珊， 吴青兰， 张国权*
（西北农林科技大学 食品科学与工程学院，陕西 杨凌 712100）

摘要： 以马铃薯淀粉为原料，研究射频和微波加热对马铃薯淀粉的颗粒形态、内部结构、直链淀粉含量、溶解度和膨胀度、热特性和黏度特性的影响。结果发现：淀粉经微波处理比经射频处理使淀粉表面更粗糙，压痕凹陷也更多。射频处理后直链淀粉质量分数高于微波处理后的淀粉。而微波处理后淀粉颗粒的体积平均粒径均大于射频处理后的体积平均粒径。射频处理改变了淀粉的晶型且结晶度降低，微波处理晶型不变，但结晶度增加。射频处理后淀粉溶解度和膨胀度高于微波处理。淀粉糊化温度：微波处理过的淀粉>原淀粉>射频处理过的淀粉。射频处理过的淀粉峰值黏度始终高于微波处理过的淀粉。射频处理的淀粉崩解值高于微波处理。

关键词： 射频；微波；马铃薯淀粉；形态结构；热特性
中图分类号：TS 231 **文章编号：**1673-1689(2019)08-0024-08 **DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2019.08.004

Effect of Electric Heating on Physical and Chemical Properties of Potato Starch

XIA Tianyu， *JIANG Hao*， *GOU Min*， *SHEN Huishan*， *WU Qinglan*， *ZHANG Guoquan**
（College of Food Science and Engineering，Northwest A & F University，Yangling 712100，China）

Abstract： The morphology，amylose content，internal structure，viscosity characteristics and thermal properties of potato starch treated by radio frequency （RF） and Microwave were determined. The results showed that the microwave treatment make the starch surface roughened. The amylose content of potato starch after RF treatment was higher than that of microwave treated. While the particle size of the starch after microwave treatment was larger than that of RF treatment. The solubility and swelling power of potato starch after RF treatment was higher than that of microwave treated. RF treatment changed the crystallinity of the starch and decreased the crystallinity，as the microwave treatment does not change the crystal form. The microwave treated starch gelatinization temperature was higher than that of the original starch，oppositely，the RF treated starch gelatinization temperature was lower than that. The results also indicated that the peak viscosity and the breakdown value of the RF treated starch was always higher than that of the microwave treated starch.

Keywords： radio frequency，microwave，potato starch，morphological structure，Thermal properties

收稿日期： 2017-07-06
基金项目： 国家自然科学基金项目(31601485)。
* **通信作者：** 张国权(1968—)，男，博士，教授，博士研究生导师，主要从事谷物品质评价及淀粉工程技术等方面研究。
E-mail：Zhanggq98@126.com
引用本文： 夏天雨，江昊，苟敏，等. 马铃薯淀粉介电处理理化性质研究[J]. 食品与生物技术学报，2019，38(08)：24-31.

马铃薯(*Solanum tuberosum*),俗称土豆,起源于南美洲,是茄科茄属多年生块茎植物。马铃薯具有营养丰富,产量高,适应环境的能力强等优点,具有食疗保健功效,是中国主要的经济作物之一,也是世界第四大主要作物。中国的马铃薯种植历史已有大约 400 年的时间,特别是近 20 年来,中国马铃薯种植规模快速发展,其产量占世界的 20%,亚洲的 70%左右。马铃薯除少量蛋白质、维生素、矿物质外,主要由淀粉组成。马铃薯淀粉可为人体提供大量的能量且含有较多抗性淀粉。虽然马铃薯中的蛋白质质量分数较少,但其氨基酸、赖氨酸质量分数明显高于日常主食的大米、白面等谷物食品[1]。马铃薯维生素主要包括维生素 C、维生素 B6 及叶酸等,矿物质中钾的质量分数高[2]。近年来培育出的彩色马铃薯具有较高的酚类物质,具有较强的抗氧化作用[3]。

薯条、薯片和马铃薯全粉是马铃薯的主要相关产品。加工方式主要有冷冻干燥、微波干燥、热风干燥和滚筒干燥等[4]。传统的加热方式依赖于热传导和热对流,将热量从加热源传输到产品,这需要相对更长的加工时间[5]。冷冻干燥对营养物质的破坏小,但能量消耗大,成本高。微波干燥也对营养物质破坏小,加热时间短,但在加热均匀性上还有待提高[6]。热风干燥和滚筒干燥对产品的营养特性有着较大的破坏,同时对产品质地也有较大影响。

本实验采用射频干燥方法对马铃薯淀粉进行处理,射频作用机制与微波一致,由于设备施加的交变电场引起物料内部振荡偶极子分子和迁移离子产生分子摩擦,使物料产热[7]。由于水的偶极性,水分子存在会导致介电加热。当电磁波入射到水分子上时,永久极化的偶极子分子试图在电场方向重新排列。由于电场的频率高,这种重新排列每秒发生一百万次,并导致分子的内部摩擦,导致物料的体积加热。射频加热的另一个原因在于在高频振荡电场的作用下,食物中的离子振荡迁移而产生热量[8]。因为射频的穿透程度大,可以更好地深入到物料中,所以可以得到比微波加热更优的加热均匀性,且在高功率水平下比微波更经济[9]。作为马铃薯中含量最多的营养物质,微波和射频处理后对马铃薯内部淀粉结构与理化性质的变化还不清楚,而这些特性显著影响马铃薯的加工性质,研究射频处理对马铃薯淀粉结构变化影响对工业加工具有指导作用。

本文通过对复水处理后不同含水量(质量分数 30%、50%、70%)的马铃薯淀粉进行射频处理和微波处理并探明其理化结构性质,研究微波/射频处理对淀粉结构和理化性质的影响规律。

1 材料与方法

1.1 材料和仪器

马铃薯淀粉购买于 aladdin,上海 aladdin 生化科技股份有限公司;格兰仕微波炉(P70D20AP-TF(W0)),广东格兰仕微波生活电器制造有限公司;射频发生器(SJ-9A-27-JY),河北华氏有限公司;激光粒度仪(MASTERS12ER-2000),英国 Malvern 公司;扫描电子显微镜(S-3400N),日本 Hitachi Limited 公司;数码显微镜(DMBA400),麦克奥迪实业集团;紫外可见分光光度计(UV-1700),日本岛津公司;差式扫描量热分析仪(Q2000),美国 TA 公司;快速黏度分析仪(SUPER3 RVA),澳大利亚 Newport 公司;X-射线衍射仪(D/max2200PC),日本理学公司。

1.2 方法

1.2.1 淀粉预处理 30 g 马铃薯淀粉与 70 g 蒸馏水混合,在室温下(24 ℃)用磁力搅拌器搅拌 2 h。50 g 马铃薯淀粉与 50 g 蒸馏水混合,在室温下用磁力搅拌器搅拌 2 h[10]。70 g 马铃薯淀粉与 30 g 蒸馏水均匀混合,室温下静置过夜 12 h。(简要表示为射 30、射 50、射 70、微 30、微 50、微 70)

1.2.2 淀粉的介电处理 2 450 MHz 微波处理:把淀粉水溶液放入托盘中,并将其置于微波炉的中心,在 800 W 下加热 5 min。使加热温度始终低于糊化温度。除去糊化的淀粉颗粒,在 40 ℃下干燥并过 300 目筛。

27 MHz 射频处理:把淀粉水溶液放置在托盘中,置于极板中心,在 115 mm 条件下射频加热 5 min。使加热温度始终低于糊化温度。除去糊化的淀粉颗粒,在 40 ℃下干燥并过 300 目筛。

1.2.3 直链淀粉含量测定 量取 1 mL 预处理淀粉,加 0.5 mL 的 ConA 溶液,盖上盖子,反复颠倒,混匀。避免样品起泡。室温静置 1 h。14 000 r/min 室温下离心 10 min。取 1 mL 上清液,加入 3 mL 100 mM 乙酸钠缓冲液,混匀。轻轻塞住管口,沸水浴 5 min,使 ConA 变性。在 40 ℃下水浴,平衡 5 min,加 0.1 mL 淀粉转葡萄糖苷酶和α-淀粉酶的混合物,继续反应 30 min 后,2 000 r/min 离心 5 min。量取 1 mL 上清液,加 4 mL GOPOD 试剂,40 ℃下反应

20 min,在 510 nm 下测定吸光度值。

1.2.4 淀粉颗粒粒度分布 将淀粉水溶液放进水中用超声波分散进样,激光衍射法自动分析。

1.2.5 扫描电子显微镜观察 将淀粉均匀放置在导电胶上,固定在载物台上,喷金处理。在 1 500 倍下,用扫描电子显微镜观察。

1.2.6 偏光十字观察 参考 Zhang 等[11]方法。把 1 mg 淀粉均匀分散在 5 mL 离心管中,将一滴淀粉悬浮液滴在载玻片上并覆盖盖玻片,用偏光显微镜观察。

1.2.7 X-射线衍射晶体衍射图谱 使用步进扫描法进行测定。测定条件:特征射线为 Cu 靶;管压为 40 kV;电流为 100 mA;测量角度为 2θ=4~60°;步长为 0.02°;扫描速度为 6 °/min。

1.2.8 淀粉的黏度特性 依据 AACC76—21 方法:根据水分含量,称量 3 g 左右的淀粉,加入大约 25 mL 蒸馏水,混匀,放置在铝盒中。温度变化程序为:50 ℃保持 1 min;3.75 min 内加热到 95 ℃;在 95 ℃保持 2.5 min,在 3.75 min 内降到 50 ℃,然后在 50 ℃保持 2 min,测得糊黏度曲线。分析峰值黏度、谷黏度、衰减值、最终黏度、回生值、峰值时间及成糊温度。

1.2.9 淀粉的热特性 称取 3~5 mg 淀粉于铝制坩锅中,加入一定量去离子水混匀(样品:水=1:2),密封后平衡 24 h 测定,以空白为对照,以 10 ℃/min 的速率升温,温度范围为 20~120 ℃,得到 DSC 曲线与起始温度(T_o)、峰值温度(T_p)、终止温度(T_c)和热焓值(ΔH)4 个特征参数。

1.2.10 傅里叶红外光谱分析 将淀粉压成薄片,放入仪器中进行扫描,实验以 KBr 为背景,在 4 000~400 cm^{-1} 范围内扫描,分辨率为 4 cm^{-1}。

1.2.11 溶解度和膨胀度 准确称取一定量的样品,配制成质量分数为 2%的淀粉乳,取 30 mL 分别在 50、60、70、80 和 90 ℃水浴中加热 30 min,以 120 r/min 振荡,并不停用玻璃棒搅拌;冷却后 3 500 r/min 离心 15 min,将上层清液倒入铝盒中,在 105 ℃下烘干至恒重,得被溶解淀粉量 A;离心管中沉淀物质量表示为 P。按式(1)和式(2)分别计算淀粉的溶解度 S 和膨胀度 B

$$S=\frac{A}{W}\times 100\% \quad (1)$$

$$B=\frac{P}{W\times(100-S)} \quad (2)$$

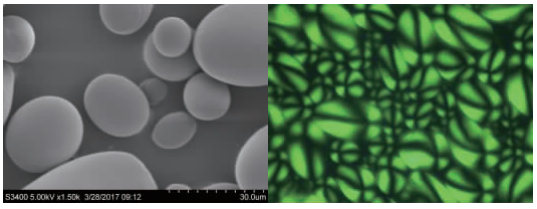
式中 W 为淀粉样品质量。

1.2.12 数据处理 以上实验均重复 3 次,用 Excel 2003、SPSS16.0 和 Origin 7.5 进行数据处理与图形绘制。

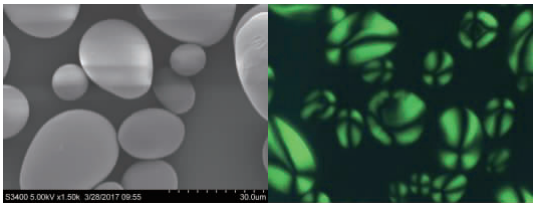
2 结果与讨论

2.1 淀粉的形态结构

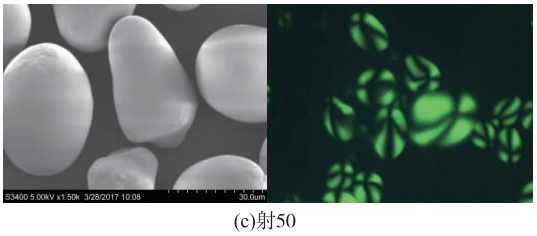
分析图 1 得到,马铃薯淀粉具有大、小两种颗粒。大颗粒为椭圆形,小颗粒为球形。经不同的介电处理后,淀粉颗粒的形状和大小没有改变,但颗粒的表面变粗糙且部分颗粒表面产生了凹陷和压痕。可以看出微波处理过的淀粉表面粗糙程度比射频处理过的严重。随着含水量的增加,两种处理方式对淀粉颗粒表面的损伤程度逐渐减小。由于淀粉中存在着淀粉分子有序排列的结晶区与淀粉分子无序排列的非结晶区,会发生各向异性现象,当偏振光通过淀粉颗粒时形成了偏光十字[12]。马铃薯原淀粉呈现出典型的偏光十字现象,偏光十字呈 X 型,十字交叉点靠近淀粉颗粒的一端。介电处理过后均对淀粉的偏光十字产生了影响,使其部分偏光十字变形,消失。偏光十字的变化趋势与扫描电镜相一致,微波处理过的淀粉偏光十字变形消失的程度均高于射频处理过的淀粉。随着含水量的增加,两种处理方式对淀粉偏光十字的破坏程度逐渐减小。介电处理使淀粉颗粒部分糊化,导致淀粉结晶区消失或重新排列,使偏光十字发生变化或消失。



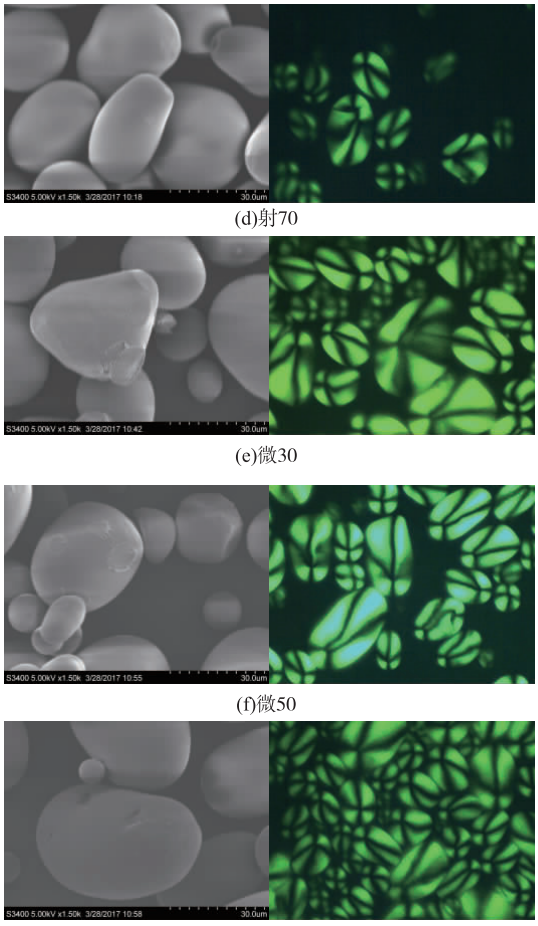
(a)原



(b)射30



(c)射50



(d)射70
(e)微30
(f)微50
(g)微70

图 1　淀粉颗粒的扫描电镜(左)与偏光十字(右)照片

Fig. 1　Scanning electron (left) and Polarized light (right) micrographs of starch

2.2　直链淀粉质量分数

经测定马铃薯原淀粉中直链淀粉的质量分数为 43.86%。由表 1 可知介电处理过后淀粉的直链淀粉含量下降非常明显，分别为 29.18%、33.07%、35.32%、27.56%、28.44%和 30.68%(射 30、射 50、射 70、微 30、微 50、微 70)。且在同一含水量时,射频处理过的淀粉的直链淀粉含量均大于微波处理过的淀粉。分析原因在于由于微波频率高,导致分子振动剧烈,对直链淀粉结构的破坏程度更高。随含水量的增加,不同介电处理的直链淀粉含量均有上升的趋势,原因或许是介电处理产生的能量优先被水吸收一部分,起到了一定的保护淀粉颗粒的作用。

2.3　粒度分布

马铃薯淀粉的体积平均粒径 $d_{(4,3)}$为 47.29 μm。由表 1 可知,介电处理后的体积平均粒径均比原淀粉小,微波处理后淀粉颗粒的体积平均粒径均大于射频处理后的体积平均粒径。说明介电处理过程中破坏了淀粉颗粒,微波处理过后可能发生了小颗粒与小颗粒之间相互聚集,小颗粒依附于大颗粒的现象。介电处理过后淀粉颗粒的大小及分布的改变会影响淀粉的糊化特性和热特性[13]。

2.4　溶解度和膨胀度

淀粉的溶解度和膨胀度与淀粉颗粒的结晶区与非晶区的相互作用有关,取决于直支比,分子量和链长分布等[14]。由表 2 可知,所有淀粉的溶解度都随温度的升高而增加，可能是由于随着温度的上升,水分子运动也随之变化剧烈,会破坏淀粉分子之间原有的氢键,使淀粉颗粒中直支链更多地暴露出来与水分子重新缔合形成氢键,从而使溶解度上升。射频处理淀粉的溶解度均大于微波处理。说明射频处理相较于微波处理具有较深的穿透能力。当温度达到 80 ℃时,射 70 和微 70 的溶解度未检出,说明其已经完全糊化形成凝胶,可能是由于制备样品时一部分水进入了淀粉颗粒内部的间隙,所以更易糊化。当温度达到 90 ℃时,剩余淀粉的溶解度均未检出,说明淀粉完全糊化形成凝胶。淀粉颗粒在

表 1　淀粉的直链淀粉质量分数、结晶度与粒度分布

Table 1　Amylose content of starch, crystallinity and particle size distribution of starch

样品	直链淀粉质量分数/%	结晶度/%	$d_{(0.1)}$	$d_{(0.5)}$	$d_{(4,3)}$
原	43.86±1.18^{a}	31.72	25.74±0.01^{c}	44.18±0.07^{a}	47.29±0.12^{a}
射 30	29.18±0.25^{e}	20.39	24.95±0.07^{f}	40.28±0.07^{f}	42.61±0.07^{f}
射 50	33.07±0.13^{c}	21.56	25.41±0.07^{d}	40.96±0.07^{e}	43.33±0.14^{e}
射 70	35.32±1.23^{b}	23.03	24.87±0.01^{g}	38.59±0.05^{g}	40.57±0.07^{g}
微 30	27.56±0.01^{f}	33.05	26.15±0.07^{a}	44.03±0.01^{b}	47.08±0.07^{b}
微 50	28.44±0.19^{e}	41.76	25.36±0.02^{e}	42.96±0.04^{c}	45.97±0.04^{c}
微 70	30.68±0.91^{d}	52.57	25.94±0.14^{b}	42.09±0.03^{d}	44.58±0.04^{d}

注:表中同列肩标不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

表 2 淀粉的溶解度与膨胀度

Table 2 Solubility and swelling power of starch %

样品	参数	50 ℃	60 ℃	70 ℃	80 ℃	90 ℃
原	溶解度	0.331 5±0.007 6^{e}	3.757 7±0.306 9^{d}	8.921 4±0.192 5^{b}	10.952 0±0.064 8^{a}	—
	膨胀度	1.894 9±0.057 3^{e}	8.474 9±0.092 9^{d}	35.492 8±0.038 3^{c}	47.442 7±0.045 3^{bc}	48.618 2±0.539 4^{ab}
射 30	溶解度	0.173 9±0.012 7^{f}	4.366 7±0.050 8^{bc}	6.539 8±0.264 2^{d}	7.925 6±0.028 4^{d}	—
	膨胀度	2.159 5±0.031 5^{e}	13.727 1±0.206 8^{e}	34.349 7±1.910 8^{e}	43.820 8±0.367 7^{d}	48.419 0±0.208 3^{ab}
射 50	溶解度	0.256 7±0.006 5^{d}	4.868 0±0.047 7^{b}	7.828 7±0.173 2^{c}	9.997 6±0.006 7^{b}	—
	膨胀度	2.238 3±0.039 0^{bc}	15.250 4±0.111 1^{b}	39.144 3±0.745 4^{b}	46.692 4±0.143 0^{c}	48.354 9±0.007 5^{ab}
射 70	溶解度	0.521 0±0.009 0^{a}	5.481 8±0.266 4^{a}	10.612 7±0.267 9^{a}	—	—
	膨胀度	2.469 8±0.025 2^{a}	18.645 2±0.483 5^{a}	43.466 5±0.645 7^{a}	48.332 8±0.070 4^{a}	48.261 8±0.495 1^{ab}
微 30	溶解度	0.150 7±0.002 9^{g}	2.234 9±0.055 5^{e}	4.175 5±0.028 0^{e}	6.478 9±0.069 6^{e}	—
	膨胀度	2.070 8±0.017 0^{d}	5.715 8±0.216 0^{e}	24.862 5±0.878 5^{e}	32.694 4±0.725 1^{f}	47.926 9±0.8885 ^{b}
微 50	溶解度	0.240 3±0.004 8^{e}	3.908 6±0.368 3^{cd}	6.892 5±0.136 8^{d}	8.935 1±0.063 5^{c}	—
	膨胀度	2.223 4±0.190 9^{c}	8.816 1±0.091 1^{d}	30.689 7±0.967 9^{d}	39.780 8±0.397 4^{e}	48.677 2±0.338 0^{ab}
微 70	溶解度	0.449 4±0.000 2^{b}	4.865 9±0.056 8^{b}	10.624 5±0.335 0^{a}	—	—
	膨胀度	2.313 9±0.037 2^{b}	15.499 7±0.103 2^{b}	39.235 9±0.484 6^{b}	47.571 4±0.128 2^{ab}	49.038 9±0.540 5^{a}

注:表中同列肩标不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

过量水中加热时,颗粒结构被破坏水分子与直链和支链淀粉中的羟基结合形成氢键,于是就会导致淀粉颗粒的膨胀[15]。膨胀度的趋势与溶解度基本保持一致。膨胀度在 60 和 70 ℃之间,70 与 80 ℃之间有较大的增加。第一次增加可能是因为达到淀粉糊化温度后,淀粉大量吸水,导致膨胀度大幅增加,第二次增加可能是因为大部分淀粉颗粒都被破坏,糊化基本完成造成的。在温度达到 90 ℃时,所有淀粉的膨胀度之间基本上没有显著差异,说明淀粉已经完全糊化。

2.5 FT-IR 光谱分析

介电处理过后未产生新基团,各化学键依然与原淀粉保持一致。3 200 cm^{-1} 附近为氢键缔合的 O-H 伸缩振动峰,1 161 cm^{-1} 附近为 C-O-C 的伸缩振动和 C-C、C-H 的骨架结构。980 cm^{-1} 附近的峰由 C-OH 弯曲振动引起, 与淀粉大分子的羟基间所形成的氢键结构相对应与无定形区有关 [16]。858 cm^{-1} 附近的峰反映 α-1,4 糖苷键的含量,见图 2。

2.6 X-射线衍射图谱分析

分析图 3 可知, 原淀粉在 5.66、17.18、22.22、24.16°处有较强的衍射峰。因此原淀粉为典型的 B 型淀粉。淀粉经微波处理后,晶型不变,随水分含量的增加,5.66、22.22、24.16°处峰强逐渐减小 , 结晶度逐渐上升。微波处理使淀粉中的直链淀粉与直链淀粉之间,直链淀粉与支链淀粉之间重新缠绕形成双螺旋结构,使分子排列更有序、提高了结晶性[13]。淀粉经射频处理后,位于 5.66°处的峰消失,22.22 和 24.16°处的双峰合并成一个单峰, 即淀粉的晶型由典型的 B 型转变为 C 型。这与 Lee 等[17]的结论一致。原淀粉的结晶度为 31.72,经射频处理过的淀粉结晶度显著地下降。消失的峰和下降的结晶度说明破坏了淀粉颗粒的结晶区。在相同含水量时,经微波处理后淀粉的结晶度均大于由射频处理过的淀粉。说明微波处理过后的淀粉出现了重结晶现象,可能是其支链淀粉含量高,淀粉分支度大,更易形成结晶且新形成的结晶大。随着含水量的增加,不同介电处理的淀粉结晶度均增加,微波处理过的淀粉结晶度显著增加。对于经射频处理过的淀粉来说,可能水分吸收一部分射频产生的能量,降低了其对晶体的破坏程度。

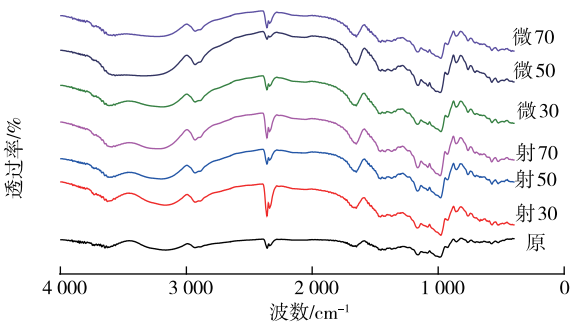


图 2 淀粉的傅里叶红外图谱

Fig. 2 FT-IR spectra of starch

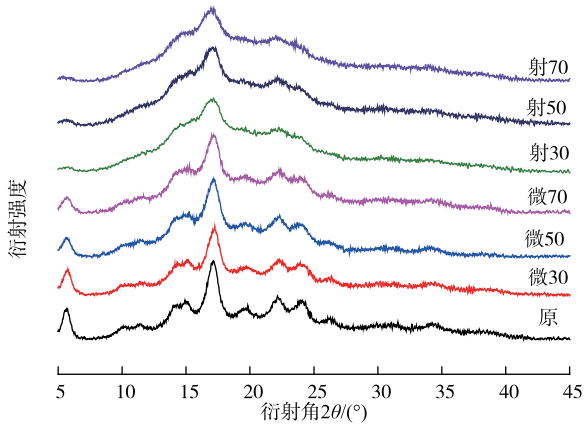


图 3 淀粉的 X 射线衍射图谱

Fig. 3 X-ray diffraction pattern of starch

2.7 热特性分析

由表 3 可知,原淀粉的起始温度、峰值温度、终止温度、热焓值分别为:60.12、64.07、86.46 ℃和 19.74 J/g。微波处理过的淀粉糊化温度均高于原淀粉,且不同含水量之间差异显著。射频处理过的淀粉糊化温度均低于原淀粉,且不同含水量之间没有明显的差异。原因是微波处理过后淀粉重新形成了新的双螺旋结构,使淀粉结晶更致密,且结晶区增大,即需要更高的糊化温度才能彻底破坏其晶体结构[18]。射频处理破坏了本来就存在着的双螺旋结构,破坏结晶区所以糊化温度下降。这也与 XRD 得出的结果一致。热焓值是破坏由淀粉形成的双螺旋所需的能量。介电处理后淀粉的热焓值与原淀粉相比明显降低。热焓值降低表明存在于结晶区或非晶区的淀粉双螺旋结构在介电处理期间被破坏。相同含水量时,经微波处理过淀粉的热焓值均高于经射频处理过淀粉的热焓值。表明微波处理淀粉后形成了更多的双螺旋结构,使其淀粉晶体增多。

表 3 淀粉的热特征值参数

Table 3 Thermodynamic properties of starch

样品	起始温度/℃	峰值温度/℃	终止温度/℃	热焓值/(J/g)
原	60.12±0.19^{e}	64.07±0.28^{c}	86.46±0.98^{a}	19.74±0.23^{a}
射 30	59.10±0.11^{d}	62.83±0.22^{de}	72.43±0.65^{e}	14.26±0.71^{c}
射 50	59.22±0.21^{d}	63.02±0.19^{d}	77.47±1.95^{cd}	15.92±0.72^{bc}
射 70	58.79±0.15^{d}	62.67±0.17^{e}	75.75±2.40^{de}	15.20±0.14^{bc}
微 30	61.77±0.62^{a}	65.69±0.18^{a}	80.56±1.87^{bc}	15.23±0.95^{bc}
微 50	60.96±0.17^{b}	64.61±0.22^{b}	83.13±2.76^{ab}	17.06±0.31^{b}
微 70	60.25±0.34^{c}	64.11±0.14^{c}	82.37±4.41^{b}	16.89±2.41^{b}

注:表中同列肩标不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.8 黏度特性

原淀粉的峰值黏度、最低黏度、最终黏度、崩解值、回生值、峰值时间、糊化温度分别是:4 351.67、1 424.33、1 626.67、2 927.33 和 202.33 cp 以及 3.16 s、66.93 ℃。由表 4 和图 4 可知,淀粉的峰值黏度具有显著差异,射 70>微 70>原>射 50>微 50>射 30>微 30。相同处理条件下,淀粉的峰值黏度随含水量的增加而增加。在相同含水量条件下,射频处理淀粉的峰值黏度总是高于微波处理淀粉的峰值黏度。当水分含量低于 50%时,淀粉的峰值黏度均小于原淀粉。随着水分含量的增加,崩解值逐渐增大,相同含水量条件时,射频处理淀粉的崩解值比微波处理的高。当微波处理含水量 30%的淀粉时观察到最小值。崩解值体现的是淀粉的抗剪切能力。低崩解值说明在加热时对剪切缺乏抵抗力。经微波处理过后的淀粉剪切能力下降。回生值与淀粉回生特性有关。回生值越低说明越不容易老化。随着含水量的增加回生值呈下降状态。表明介电处理可以降低淀粉的回生性。使处理过的淀粉更适合烘焙食品,可以延长保质期。

表 4 淀粉的糊化特性

Table 4 Pasting parameters of starch

样品	峰值黏度/cp	最低黏度/cp	崩解值/cp	最终黏度/cp	回生值/cp	峰值时间/s	糊化温度/℃
原	4351.67±26.31^{e}	1424.33±9.61^{f}	2927.33±20.21^{b}	1626.67±8.62^{e}	202.33±9.02^{ab}	3.16±0.04^{d}	66.93±0.06^{b}
射 30	3966.33±28.75^{f}	1637.67±7.09^{e}	2328.67±32.13^{d}	1813.00±22.34^{c}	175.33±28.92^{bc}	3.71±0.04^{b}	65.83±0.46^{cd}
射 50	4240.67±63.07^{d}	1595.33±15.63^{e}	2645.33±78.68^{c}	1761.67±24.58^{d}	166.33±11.06^{bc}	3.42±0.10^{c}	66.12±0.85^{c}
射 70	4623.33±23.07^{a}	1625.00±17.52^{cd}	2998.33±31.64^{a}	1780.00±30.51^{cd}	155.00±16.70^{c}	3.22±0.04^{d}	65.07±0.49^{d}
微 30	3273.00±20.30^{g}	1864.67±4.51^{a}	1408.33±22.50^{e}	2084.33±27.47^{a}	219.67±23.25^{a}	4.60±0.00^{a}	68.62±0.06^{a}
微 50	4059.67±25.50^{c}	1705.00±5.57^{b}	2354.67±29.37^{d}	1872.33±22.23^{b}	167.33±26.86^{bc}	3.69±0.10^{b}	68.10±0.48^{a}
微 70	4563.33±7.51^{b}	1614.33±3.21^{d}	2949.00±10.54^{ab}	1768.00±15.87^{d}	153.67±17.79^{c}	3.22±0.04^{d}	66.98±0.03^{b}

注:表中同列肩标不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

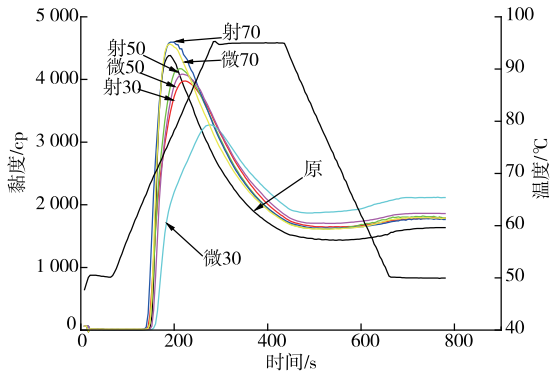


图 4　淀粉的 RVA 曲线

Fig. 4　Pasting curves of starch

3 结　语

1）介电处理对马铃薯淀粉颗粒的形态大小无影响，主要影响颗粒表面、粒度分布和内部结构。颗粒表面出现压痕凹陷，体积平均粒径减小，偏光十字变形消失，直链淀粉质量分数减少，结晶区发生改变，分子基团则无明显变化。

2）结构变化直接影响理化性质的变化，微波处理可以提高淀粉的糊化温度，射频处理降低淀粉的糊化温度。在高水分含量下，介电处理增加了淀粉的峰值黏度。介电处理显著降低淀粉的回生值，使处理过的淀粉更适合烘焙食品，可以延长其保质期。

3）淀粉经微波处理比经射频处理使淀粉表面更粗糙，压痕凹陷也更多。经微波处理后淀粉颗粒的体积平均粒径和糊化温度高于经射频处理过的淀粉。射频处理后淀粉的直链淀粉质量分数、溶解度、膨胀度、峰值粘度和崩解值高于经微波处理过的淀粉。射频处理使淀粉晶型发生了由 B 型到 C 型的转变且结晶度降低，微波处理不改变晶型，结晶度增加。

参考文献：

[1] ZENG Fankui,XU Dan,LIU Gang. Potato nutrition:A critical review [J]. **Chinese Potato Journal**,2015,29 (4):233-243.(in Chinese)

[2] XU Haiquan,WANG Xiuli,MA Guansheng. Nutrition feasibility analysis of development of Potato as astaple food[J]. **Food and Nutrition in China**,2015,21(7):10-13.(in Chinese)

[3] WANG Yaohong,WANG Lei,ZHAO Peng,et al. Effects of domestic cooking methods on phenol contents and antioxidant activity in purple-fleshed Potatoes[J]. **Food Science**,2017,38(7):115-121.(in Chinese)

[4] YANG Manqian,DONG Quan. Research progress on the processing technology and applications of Potato granules [J]. **Cereals & Oils**,2017,30(2):7-11.(in Chinese)

[5] ZHAO Y,FLUGSTAD B,KOLBE E,et al. Using capacitive (radio frequency) dielectric heating in food processing and preservation-A review[J]. **Journal of Food Process Engineering**,2010,23(1):25-55.

[6] CHANDRASEKARAN S,RAMANATHAN S,BASAK T. Microwave food processing—A review [J]. **Food Research International**,2013,52(1):243-261.

[7] PIYASENA P,DUSSAULT C,KOUTCHMA T,et al. Radio frequency heating of foods:principles,applications and related properties—a review[J]. **Critical Reviews in Food Science & Nutritio**n,2003,43(6):587-606.

[8] DATTA A K,DAVIDSON P M. Microwave and radio frequency processing[J]. **Journal of Food Safety**,2010,65(S8):32-41.

[9] LUECHAPATTANAPORN K,WANG Y,WANG J,et al. Microbial safety in radio-frequency processing of packaged foods[J]. **Journal of Food Science**,2010,69(7):201-206.

[10] JIANG H,ZHANG M,FANG Z,et al. Effect of different dielectric drying methods on the physic-chemical properties of a starch-water model system[J]. **Food Hydrocolloids**,2016,52(2):192-200.

[11] ZHANG B J,LI X X,LIU J,et al. Supramolecular structure of A- and B-type granules of wheat starch [J]. **Food Hydrocolloids**,2013,31(1):68-73.

[12] YANG Jingfeng,LUO Zhigang,LUO Faxing. Progress in research on starch crystal structure [J]. **Science and Technology of Food Industry**,2007(7):240-243.(in Chinese)

[13] YANG Q,QI L,LUO Z,et al. Effect of microwave irradiation on internal molecular structure and physical properties of waxy

maize starch[J]. **Food Hydrocolloids**,2017,69:473-482.
[14] SINGH N,KAUR L. Morphological,thermal,rheological and retrogradation properties of potato starch fractions varying in granule size[J]. **Journal of the Science of Food & Agriculture**,2004,84(10):1241-1252.
[15] LI W,SHAN Y,XIAO X,et al. Physicochemical properties of A- and B-starch granules isolated from hard red and soft red winter wheat[J]. **Journal of Agricultural & Food Chemistry**,2013,61(26):6477-6484.
[16] MAN Jianmin,CAI Canhui,YAN Qiuxiang,et al. Applications of infrared spectroscopy in the analysis of ordered structure of starch grain[J]. **Acta Agronomica Sinica**,2012,38(3):505-513.(in Chinese)
[17] LEE C J,YANG K,CHOI S J,et al. Slowly digestible starch from heat-moisture treated waxy potato starch:Preparation,structural characteristics,and glucose response in mice[J]. **Food Chemistry**,2012,133(4):1222-1229.
[18] PARK I M,IBANEZ A M,ZHONG F,et al. Gelatinization and pasting properties of waxy and non - waxy rice starches[J]. **Starch - Starke**,2007,59(8):388-396.

会　议　消　息

会议名称:中国化学会第十六届全国化学动力学会议

会议时间:2019 年 10 月 11–14 日

会议地点:江苏省苏州市

主 办 方:中国化学会

承 办 方:中国化学会化学动力学专业委员会、复旦大学、苏州大学

会议主题:展示化学动力学领域中的最新成果,研讨当前国际研究动态、热点、前沿和发展趋势,促进化学动力学研究的发展。

大会主席:杨学明

预计规模:650 人

联 系 人:陈末华

电子邮箱:chenmh@fudan.edu.cn

电　　话:18930072783

地　　址:上海市淞沪路 2005 号复旦大学江湾校区化学楼 A3010 室

会议内容:气相、凝聚态和界面化学动力学;离子、自由基和团簇化学动力学;动力学光谱、激光化学和光化学动力学;化学反应动力学理论、实验新方法;生物分子化学动力学。