

文章编号:1000-8551(2020)02-0363-07

微波的热与非热效应对淀粉性质的影响

刘 昊 顾丰颖 刘子毅 王博伦 张 帆 杨婷婷 王 锋*

(中国农业科学院农产品加工研究所/农业农村部农产品加工综合性重点实验室,北京 100193)

摘 要:微波是波长微小的电磁波,具有很强的介质穿透能力,可实现物料内外的同时升温。在利用微波熟化淀粉类食品时,具有热效率高、可控性强、设备占地小等优点。本文介绍了淀粉升温糊化过程中微波热效应和非热效应;总结了研究微波非热效应的几种新手段;比较了微波处理与热传导处理在淀粉升温糊化过程中,淀粉颗粒外观特征、晶体结构和分子结构的变化以及热学特性的差异;论述了微波处理淀粉乳中水的响应。本文为后续深入研究微波处理对食物中淀粉糊化的影响与微波糊化淀粉特性的开发利用提供了参考。

关键词:微波热效应;微波非热效应;淀粉糊化;淀粉结构

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2020.02.0363

微波技术从20世纪40年代开始应用于食品工业,历经不到百年的发展,如今已广泛应用于食品干燥^[1]、杀菌^[2]、烘焙、解冻、萃取^[3]等领域,且在农产品调质^[4]、膨化^[5]、杀青^[6]以及淀粉、蛋白质大分子改性^[7]等领域具有巨大的应用前景。对于富含淀粉的食品,微波加工对淀粉结构、性质的改变将直接影响其品质。本文详述了在微波热效应和非热效应作用下淀粉的糊化特征、结构及理化性质的变化,并比较了淀粉升温糊化过程中微波处理与常规热处理的差异,以期为微波加工技术的开发与应用提供理论参考。

1 淀粉糊化的微波热效应

微波热效应是在微波场下,极性分子和离子在电力矩的作用下,随微波场正负极的周期性变化而高频旋转振荡,从而将吸收的微波能转化为动能,由于分子间的相互碰撞摩擦,又将动能转化为热能,使体系升温。在淀粉水合体系中,淀粉分子为非极性介质,极性分子主要是水。未加微波场时,水分子做无规则运动,体系宏观上呈电中性;当其处于微波场时,水分子重新排列,在一定空间范围内做高频振动^[8]。由于盐分的

添加或加工用水未去离子化,淀粉水合体系中也含有一定量的盐离子,淀粉分子在邻近的水分子和盐离子的摩擦碰撞以及热传导作用下,不断升温,淀粉颗粒逐渐溃解糊化。

2 淀粉糊化的微波非热效应

微波热效应和非热效应与物料内部水分子等介电质的高频震荡密切相关,二者往往同时存在。微波非热效应是一种无法用温度变化来阐释的特殊效应,是微波功率、辐射时间、辐射方式、生物体属性等多种因素相互影响的结果。非热效应对酶催化反应^[9]、细胞代谢^[10]、化学反应^[11]以及淀粉的理化特性与氢键断裂等均有影响。梁瑞红等^[12]发现非热效应加速了果胶链的断裂,使果胶降解程度更高;张金伟等^[13]在热变性温度以下对微波处理的胶原蛋白进行研究,发现微波非热效应抑制了胶原蛋白的聚集。微波非热效应会导致超温沸腾现象,这是由于当液体温度升高时,其表面张力会降低。但在同等温度下,微波处理的无水乙醇表面张力比传统加热方式更高^[14]。这些研究证明了微波非热效应的真实存在,且对物料的处理效果

收稿日期:2019-06-11 接受日期:2019-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31871730),农业部大宗粮食加工重点实验室开放基金(DZLS201707),中国农业科学院科技创新工程协同创新任务(CAAS-XTX2016003)

作者简介:刘昊,男,主要从事玉米加工及品质调控研究。E-mail:m15639052039@163.com

*通讯作者:王锋,男,研究员,主要从事谷物加工及品质调控研究。E-mail:fengwang88@souhu.com

产生了影响。根据 Arrhenius 公式,在研究非热效应对淀粉糊化的影响时需要控制升温速率、淀粉糊化时间等变量,以模糊微波热效应对淀粉糊化的影响。由此开发了 SiC 反应器技术、低功率微波辐射技术、微波辐射同步冷却技术及同步升温技术等。

在 SiC 反应器技术的处理过程中,极性强的 SiC 能将微波基本全部吸收,消除了微波对物料的热效应,以此研究微波非热效应^[15-16]。低功率微波辐射技术通过施予物料相对较低的微波能,使微波能主要转化为动能,而由动能转化为热能的部分可忽略不计,可在物料恒温的状态下研究非热效应。同步升温技术,可将微波加热与其升温速率保持一致的热传导加热进行比较,从而研究淀粉的糊化过程存在明显差异,由此

推断微波加热淀粉的糊化过程,受热效应和非热效应的同时作用^[17-18]。微波辐射同步冷却技术借助压缩空气或硅油等冷却介质,将物料产生的热量及时带走^[19],较为理想地分离了微波热效应,由此可以单独分析微波非热效应。

范大明等^[20]用微波辐射同步冷却技术测定了经长时间微波非热处理的小麦面浆在 60℃ 时的流变学特性,发现在升温初期,微波处理样品的粘度较大,认为这可能是微波非热处理导致样品中长链淀粉分子降解成短链,在糊化时淀粉分子得以充分溶胀、伸展,故整体粘度增加。目前,关于微波非热效应对淀粉升温糊化影响的相关研究见表 1。

表 1 微波非热效应对淀粉升温糊化的影响

Table 1 Influence of microwave non-thermal effect on temperature rise and gelatinization of starch

所用淀粉 Starch used	试验条件 Experimental processing	作用效果 Effects	参考文献 References	
小麦淀粉 (料液比 10%) Wheat starch (starch to liquid ratio 10%)	微波辐射同步冷却处理 1 500 s, 功率 250 W	抑制糊化淀粉前期老化速率逐渐增加	[20]	
大米淀粉 (料液比 6%) Rice starch (starch to liquid ratio 6%)	2.45 GHz,微波程序升温: 1 200 W-32 s, 600 W-20 s, 300 W-14 s, 600 W-12 s	升温初期	阻碍层状结构的不规则交替	[19]
		50℃ 以下时	促进样品活化能、糊化焓的增加(50℃ 达峰值)	[17]
		50℃ 以上时	促进淀粉亚微观结构的破坏	[17]
		60℃ 以上时	促进淀粉半结晶生长环层状结构的破坏	[17]
		65℃ 时	促进 C-O 类化学基团振动;C-O、C-C 伸缩振动;C-O-H 弯曲振动	[21]
		促进 C-H 类化学基团振动;CH ₂ 伸缩振动	[21]	
		促进骨架相关振动:α-1,4 糖苷键,(C-O-C)等相关骨架模式	[21]	
马铃薯淀粉 (料液比 3%) Potato starch (starch to liquid ratio 3%)	2.45 GHz,微波程序升温: 1 000 W-70 s, 350 W-50 s, 650 W-25 s	低温阶段	促进淀粉颗粒表面的粗糙	[18-22]
		50℃ 以上时	促进淀粉分子间及淀粉与水之间氢键的破坏	[18-22]
		65℃ 时	促进 C-H 类化学基团振动;CH ₂ 剪式振动,C-H 和 C-O-H 变形振动	[23]
		促进 C-H 类化学基团振动;CH ₂ 扭转振动和 C-O-H 弯曲振动	[23]	

3 微波处理对淀粉结构物性的影响

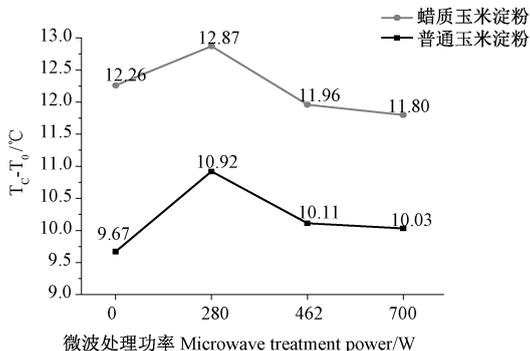
3.1 微波处理对淀粉糊化及老化特性的影响

微波处理可使淀粉糊化焓下降,糊化温度升高,糊化温度范围扩大,糊化淀粉稳定性增强,老化趋势延缓。糊化焓的下降是由于淀粉颗粒结晶区或无定形区的部分双螺旋结构随水的高频振动而遭到破坏,导致分子间氢键作用减弱,使得解旋时所需能量减小;但微波功率过高会使得淀粉糊粘度降低,从而热焓值上升。

对大米淀粉(粳米)^[21]、玉米淀粉(普通、蜡质)^[24]的相关研究发现,淀粉糊化焓随微波功率的增加呈先下降后上升的趋势。Xu 等^[25]对含水量 30% 的玉米及马铃薯淀粉,以 0.00、2.06 和 6.63 W·g⁻¹ 的微波剂量处理 5 min 后,发现糊化焓随功率的增大而减小;在对含水量 30% 的木薯淀粉进行微波处理时,同样发现淀粉糊化温度上升,糊化焓下降,但变化幅度不一^[26],这可能与不同来源淀粉颗粒中直/支链淀粉比例不同有关。

淀粉糊化温度范围 T_c-T₀ 反映了淀粉晶体结构的差异度,T_c-T₀ 值越大说明淀粉内不同状态的晶体结

构差异越大,如图 1 所示,随着微波功率的增加, T_c-T_0 先升后降^[27]。分析认为,对于低功率微波处理的淀粉糊,淀粉的扰动仅增加了分子链流动性与较弱结构的不稳定性;随着微波处理功率的增加,不稳定的晶体结构逐渐被破坏,有晶体特性的结构含量降低,整体均一化,所以 T_c-T_0 值逐渐下降。



注:含水量 30% 的淀粉分别于 0、280、462、700 W 下处理 60 s。

Note: The starch with 30% water content was treated at 0, 280, 462, 700 W for 60 s, respectively.

图 1 微波处理功率对普通玉米淀粉、蜡质玉米淀粉 T_c-T_0 值的影响

Fig.1 Effect of microwave treatment power on T_c-T_0 value of common corn starch and waxy corn starch

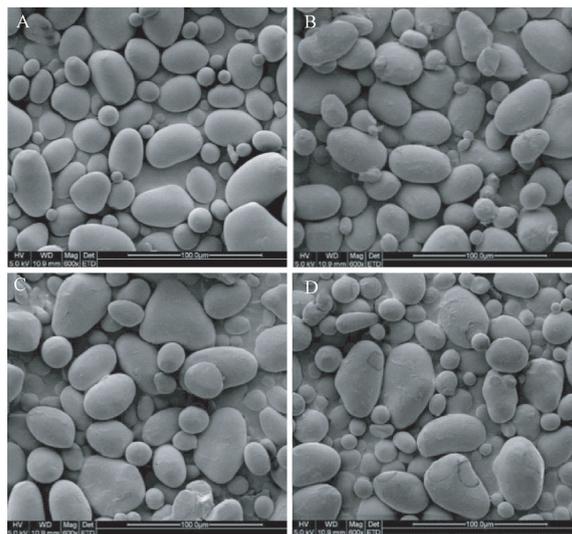
微波处理下的淀粉颗粒迅速升温,使得双螺旋结构排列得更紧密,同时由于水分向内扩散时间相对较短,淀粉分子未能得到充分舒展,颗粒吸水膨胀困难^[28],膨胀程度远不及加热至同等温度时的热传导加热淀粉,起始糊化温度会更高。微波处理大米淀粉糊化特性的研究发现,糊化温度随处理功率和时间的增加而升高^[29]。随着淀粉水合体系温度进一步上升,淀粉分子在水分子高频摩擦碰撞下,短时间内崩解糊化,糊化所用总热量低于热传导加热。

有研究发现,在短时间内微波糊化的淀粉老化趋势得到延缓,微波处理可使淀粉分子具有趋向性,抑制了糊化淀粉晶核的形成,提高了凝胶网络的稳定性^[30-31]。也有观点认为微波处理使得直链淀粉分子链更短,在老化初始阶段不利于新的晶体结构形成,从而抑制了老化进程^[32]。当然在物料处理量较大的情况下,微波对物料的处理程度难以非常均一^[33],体系中残存着一部分未完全膨胀糊化的淀粉颗粒,在老化的前期,这些具有晶体性质的物质会加速淀粉老化。

3.2 微波处理对淀粉结构特性的影响

3.2.1 微波处理对淀粉颗粒表面的影响 在升温初

期,微波热效应与非热效应共同作用,对淀粉颗粒表面光洁度造成破坏,破坏程度主要受微波频率、直链淀粉占比的影响。在微波处理中,淀粉颗粒宏观结构的变化从颗粒表面开始,如图 2 所示,在颗粒的大小和形状尚未发生明显变化时,颗粒表面就已变得粗糙多孔^[34],受损程度与微波频率呈正相关^[35]。在微波处理过程中,淀粉水合体系中的水分子将吸收的微波能优先转化为自身动能,扩散速度增加^[36],通过高频振动,摩擦生热,使得淀粉颗粒内的水升温转化为水蒸汽。当水蒸汽生成速率高于向外迁移速率时,形成的蒸汽压差会导致颗粒表面出现沟纹和皱褶^[37]。陈培栋^[38]研究了微波短时间处理对初始含水量 15% 的糙米质构的影响,认为淀粉链上的极性基团(-OH 基)和糖苷键等在微波场中高频振动,使得淀粉分子无定型区域和晶体结构强度遭到破坏,颗粒表面凹陷粗糙,切面有明显裂纹。有研究发现淀粉中所含的直链淀粉比例越低,微波处理后淀粉结构变化程度越大^[39]。这主要是因为,淀粉颗粒脐点部位的直链淀粉含量相对较少,分子间作用力较弱,很容易被破坏,在微波处理后,淀粉颗粒在该部位形成的沟壑较为明显(图 3)^[29];而直链淀粉含量比例较高的淀粉脐点部位的变化则不明显。



注:A 为天然淀粉;B 为 27 MHz 微波处理干燥淀粉;C 为 915 MHz 微波处理干燥淀粉;D 为 2450 MHz 微波处理干燥淀粉。

Note: A is non-dried starch. B is 27 MHz dried starch. C is 915 MHz dried starch. D is 2450 MHz dried starch.

图 2 不同微波频率处理下马铃薯淀粉 SEM 图^[35]

Fig.2 The SEM photos of potato starch under different wave length microwave treatment (600 ×)^[35]

3.2.2 微波处理对淀粉晶体结构的影响 微波处理会引起淀粉晶型的改变。淀粉分为 A、B 和 C 型 3 类

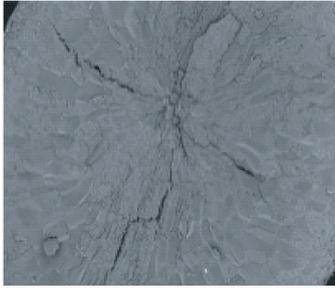


图 3 640 W 微波功率处理 60 s 的大米淀粉颗粒^[29]

Fig.3 Rice starch granules under the treatment of microwave (640 W, 60 s)^[29]

结晶型。由于 B 型晶体内中间隧道的水分子在微波加热过程中易蒸发,进而水分子所在位置被双螺旋结构占用,致使其晶型最易发生改变,稳定性最差^[35]。在糊化过程中,A 型热稳定性最好,B 型最差,C 型介于两者之间^[40-41],而淀粉总是趋于转换成更稳定的晶型。有研究发现经微波处理,高直链玉米淀粉的晶型会由 B 型变为 C 型;Zhang 等^[43]和 Szepes 等^[44]分别发现微波处理后的美人蕉淀粉和马铃薯淀粉,结晶度增加,结晶型均从 B 型转为 A 型。

淀粉分子链能够组装形成螺旋、结晶、非晶体等结构^[45],在晶体破坏方面,微波热效应与非热效应存在拮抗关系。当淀粉水合体系温度低于糊化温度时,微波热效应会破坏其结晶区,而非热效应则可以抑制此种破坏;当温度高于 60℃ 时,微波非热效应转而加速了淀粉半结晶区的破坏^[46]。所以微波加热淀粉的结晶度变化趋势与普通加热、油浴快速加热的结果一致,但在非热效应的影响下,其变化幅度介于两者之间。此外,微波热效应和非热效应间的拮抗作用还会使淀粉膨胀,导致偏光十字消失,且其颗粒形态变化的起始时间和程度介于上述两种处理之间^[18]。

3.2.3 微波处理对淀粉分子结构的影响 微波场会影响淀粉中基团周围电子云的排布、化学键^[47]及其结构的稳定性。在糊化过程中,微波热效应是淀粉半结晶生长环等亚微观结构溃解的主要原因。在微波处理大米淀粉^[17]与马铃薯淀粉^[23]的研究中均发现,微波热效应使极性基团的振动强度发生明显变化,引起淀粉双螺旋结构、V-型单螺旋结构、无定型结构含量的变化。有研究发现随着微波功率的增加,淀粉的单/双螺旋含量降低、结晶度降低^[27]。自由体积是淀粉颗粒中分布于分子链段间的无规则空穴,对分子的运动、淀粉结构以及糊化性能等有重要影响^[48]。当自由体积较小时,分子间的摩擦可能会促进大分子侧链断裂,造成直链淀粉含量比例上升,使淀粉颗粒在加热过程中

更易溃解。热传导处理淀粉的自由体积随温度变化不大,而微波加热淀粉自由体积随温度的增加呈先上升后下降的趋势。因为在升温初期,热效应增加了淀粉双螺旋分子间的氢键强度,促使支链淀粉的双螺旋结构更加紧密有序地排列于结晶层^[49]。闫博文等^[50]研究发现,在 50℃ 时大米淀粉的自由体积最小,淀粉结构排布更为紧密;高于 50℃ 时,微波非热效应会促进淀粉亚微观结构的破坏和氢键的断开。

常见的低频率大波长的电磁波不具备断裂化学键的能力,淀粉在微波场中也不会形成新的化学键及官能团^[21,51]。研究发现在微波加热初期,微波热效应增加了淀粉双螺旋分子间的氢键强度,但随着温度的升高,淀粉分子间的氢键强度逐渐减弱^[49],与水形成的氢键增多^[52]。Kizil 等^[53]研究了 4 种淀粉在微波处理前后的化学键振动情况,发现 O-H、C-H 及糖苷键等受微波影响较大。微波处理还会引起淀粉的自由基反应,使淀粉自由基含量明显增加^[54-55],且可在室温条件下稳定存在^[56-57]。Fan 等^[58]进行了微波处理大米淀粉的自由基生成及相关化学键的研究,认为微波处理下淀粉水合体系的化学键振动强度的变化与自由基的形成具有一致性。

3.3 微波处理对淀粉乳中水的影响

干燥状态下淀粉的介电常数 ϵ' 相对较小,吸波能力差,但水分子的 ϵ' 和损耗因数 ϵ'' 较大,具有极强的吸波能力,因此淀粉水合体系总的 ϵ' 和 ϵ'' 与体系含水量有关。淀粉乳的 ϵ'' 与淀粉浓度呈一维线性关系,随着淀粉浓度下降而升高^[23]。Fan 等^[59]发现,当淀粉浓度由 30% 降至 1% 时,微波吸收率由 24.1% 提高至 69.1%。也有研究认为淀粉水合体系中淀粉和水各自的介电性质互不影响,体系的 ϵ' 是淀粉 ϵ' 和水 ϵ' 的加和^[60]。

水对淀粉水合体系介电特性的影响,也与体系中水的状态有关。在水分含量不超过 40% 的低水分含量食品中,极性物质主要是结合水,通过氢键与淀粉分子中的羟基相结合,被束缚于淀粉的结晶区或双螺旋结构内,所以从宏观上看该体系与纯水的吸波性能有显著差异;但对于淀粉乳、面糊等高水分体系,自由水则是主要的极性物质,其水分含量与体系的 ϵ' 和 ϵ'' 成正比,这是因为体系中水含量越高,其流动性越好,极性分子对微波场的响应越明显^[18]。

在淀粉颗粒中有 3 种水,分别是无定形生长环中的水,半结晶区中的水和位于 B 型支链淀粉晶体内的六边形通道中的“通道水”^[61]。在糊化过程中,淀粉颗粒粒径和结构松散程度的变化影响着水的重新分布。

在微波处理的大米淀粉和马铃薯淀粉水合体系间, 氢质子类群融合时的温度和实时水分含量存在差异, 这可能与它们的介电性质及淀粉粒径有关。高艺书^[62]发现与大米淀粉相比, 马铃薯淀粉的 ϵ' 更大。因为马铃薯淀粉的粒径较大, 比表面积较小, 水与马铃薯淀粉的相互作用要弱一些。当体系水分含量达到一定水平, 随着温度的升高, 淀粉颗粒逐渐溃解, 马铃薯淀粉水合体系的横向弛豫质子类群数目逐渐减少, 最终剩一个横向弛豫峰; 质子类群的纵向弛豫时间逐渐趋于一致^[63-64]。

4 结论

微波处理淀粉升温糊化的宏观和微观过程, 及淀粉糊化特性均与传统热传导加热和快速油浴热传导的淀粉糊化情况不同。在微波处理下, 淀粉水合体系的温度上升主要是由于水分子将微波能转化成热能, 微波非热效应是由体系内分子、化学官能团和化学键的振动变化引起的。经微波处理的淀粉, 整体表现为糊化焓下降, 糊化温度提高, 糊化温度范围扩大, 糊化淀粉稳定性增强, 老化趋势延缓。微波处理加快淀粉颗粒表面粗糙化, 以及对淀粉颗粒中无定型区域和晶体结构的破坏, 诱使一些淀粉的晶型发生变化。淀粉水合体系的介电特性与水的含量及状态有关, 若含水量大、自由水比例高, 则体系吸波热转换能力强。在生产生活中, 对微波处理淀粉性质的理解与认识, 以及在微波工艺的驾驭上依旧存在着诸多问题。微波对电子设备电信号的干扰, 导致难以精准地实时检测到淀粉水合体系的变化情况; 微波非热效应的作用机理尚不明确; 家用和工业用微波设备往往采用间歇式加热, 微波场强分布不均, 增加了产品品质调控难度。但随着光纤测温, 谐振腔异形设计, 以及微波场数字建模等手段的快速发展, 这些问题有望解决, 微波对淀粉性质的影响和作用机制的相关研究也会进一步深入。

参考文献:

[1] Nawirska-Olszańska A, Stepień B, Biesiada A. Effectiveness of the fountain-microwave drying method in some selected pumpkin cultivars [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 77: 276-281

[2] Chen M, Fan D M, Li T F, Yan B W, Gao Y S, Zhao J X, Zhao H. Synergistic bactericidal effects of basic amino acids and microwave treatment on *Escherichia coli* [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 84: 99-105

[3] 薛宏坤, 刘成海, 刘钊, 徐浩, 秦庆雨, 沈柳杨, 郑先哲. 响应

面法和遗传算法-神经网络模型优化微波萃取蓝莓中花青素工艺 [J]. *食品科学*, 39(16):280-288

[4] Junqueira J R D J, Corrêa J L G, Ernesto D B. Microwave, convective, and intermittent microwave-convective drying of pulsed vacuum osmodehydrated pumpkin slices [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41:e13250

[5] Gutiérrez-Cano J D, Hamilton I E, Catalá-Civera J M, Bows J, Peñaranda-Fox F L. Effect of water content on the dynamic measurement of dielectric properties of food snack pellets during microwave expansion [J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 232: 21-28

[6] 滑金杰, 袁海波, 王近近, 江用文, 董春旺, 邓余良. 微波杀青对茶在制品物理特性影响的初探 [J]. *茶叶科学*, 2017, 37(5): 476-482

[7] 张雪莹, 郭超凡, 陶飞, 王云阳, 傅虹飞. 不同热处理方式对玉米醇溶蛋白特性的影响 [J]. *食品科学*, 2018, 39(13):112-118

[8] Deka D, Sit N. Dual modification of taro starch by microwave and other heat moisture treatments [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 92: 416-422

[9] 蔡燕, 周红波, 吴锦明. 低温微波辐射对脂肪氧合酶催化体系的影响 [J]. *广东化工*, 2015, 42(20): 48-49

[10] Kapesúndi V, Kovács A J, Neményi M, Lakatos E. Investigation of a non-thermal effect of microwave treatment [J]. *Acta Alimentaria*, 2016, 45(2): 224-232

[11] 马祥梅, 张明旭, 闵凡飞, 王斌. 微波非热效应对有机硫化物结构的影响 [J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2016, 34(3): 46-52

[12] 梁瑞红, 王淑洁, 贺小红, 陈军, 李鹏林, 郭小娟. 微波降解果胶对其流变性质的影响及动力学 [J]. *食品科学*, 2017, 38(5): 1-6

[13] 张金伟, 曹念, 陈武勇. 微波辐照对胶原蛋白三股螺旋结构的影响 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(5): 1353-1357

[14] 王建英, 汪洋, 张雪峰, 齐海君. 微波加热对无水乙醇表面张力的影响 [J]. *兰州理工大学学报*, 2017, 43(1): 165-168

[15] Kremsner J M, Oliver Kappe C. Silicon carbide passive heating elements in microwave-assisted organic synthesis [J]. *Journal of Organic Chemistry*, 2006, 71(12): 4651-4658

[16] 郑丽娜, 辛嘉英, 王艳, 陈林林, 夏春谷. 微波对酶催化反应的影响及其微波效应的研究进展 [J]. *分子催化*, 2017, 31(6): 567-574

[17] 范大明. 微波热效应对米淀粉结构的影响 [D]. 无锡: 江南大学, 2012

[18] 马申嫣. 微波加热对马铃薯淀粉介电和物性特征的影响 [D]. 无锡: 江南大学, 2013

[19] Zhai C K, Teng N, Pan B H, Chen J, Liu F, Zhu J, Na H N. Revealing the importance of non-thermal effect to strengthen hydrolysis of cellulose by synchronous cooling assisted microwave driving [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 197: 414-421

[20] 范大明, 陈卫, 赵建新, 张灏. 一种使用微波非热处理装置的液相体系微波非热处理方法: 中国, 101285785B [P]. 2014-01-01

[21] Fan D M, Ma W R, Wang L Y, Huang J L, Zhao J X, Zhang H. Determination of structural changes in microwaved rice starch using

- Fourier transform infrared and Raman spectroscopy [J]. *Starch - Stärke*, 2012, 64(8): 598-606
- [22] Ma S Y, Fan D M, Wang L Y, Lian H Z, Zhao J X, Zhang H, Chen W W. The impact of microwave heating on the granule state and thermal properties of potato starch[J]. *Starch-Stärke*, 2015, 67(5/6): 391-398
- [23] 马文睿. 微波加热对马铃薯淀粉糊化过程中晶体及分子结构的影响[D]. 无锡:江南大学, 2013
- [24] 王雨生, 秦福敏, 陈海华, 赵阳, 闫盼. 微波处理对普通玉米淀粉和蜡质玉米淀粉理化性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(12): 18-24
- [25] Xu X J, Chen Y Z, Luo Z G, Lu X X. Different variations in structures of A- and B-type starches subjected to microwave treatment and their relationships with digestibility [J]. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie/Food Science and Technology*, 2019, 99:179-187
- [26] Lewandowicz G, Jankowski T, Fornal J. Effect of microwave radiation on physico-chemical properties and structure of cereal starches[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2000, 42(2): 193-199
- [27] 罗志刚, 徐小娟, 陈永志. 微波对马铃薯淀粉螺旋结构及消化性的影响[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(12): 1-7
- [28] 尹婧, 康丽君, 寇芳, 李文杰, 张莉莉, 曹龙奎. 微波湿热处理对薏苡仁淀粉性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(7): 60-66, 73
- [29] 张晓红, 万忠民, 孙君, 刘兵. 微波处理对大米 RVA 谱特征值和微观结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(12): 87-91
- [30] 陈卫, 范大明, 赵建新, 田丰伟, 邓娟, 张灏. 2 种糊化方式对小麦面粉流变及回生特性影响的比较[J]. *吉林农业大学学报*, 2008, 30(6): 871-875
- [31] 杜艳芳. 微波辐射对莲子质构特性的影响及抑制淀粉老化机理的研究[D]. 福州:福建农林大学, 2013
- [32] 刘敏, 韩育梅, 何君, 黄欢, 王绍帆. 马铃薯抗性淀粉的微波-湿热制备工艺优化及结构表征[J]. *食品工业科技*, 2018, 407(15): 182-186, 194
- [33] Meda V, Orsat V, Raghavan V. 2 - Microwave heating and the dielectric properties of foods[J]. *Microwave Processing of Foods*, 2017, 5(5): 23-43
- [34] 罗志刚, 扶雄, 罗发兴, 于淑娟. 微波辐射下蜡质玉米淀粉性质的变化[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(4): 35-38
- [35] Jiang H, Zhang M, Fang Z X, Mujumdar A S, Xu B G. Effect of different dielectric drying methods on the physico-chemical properties of a starch-water model system[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52(2): 192-200
- [36] Hinrikus H, Lass J, Karai D, Pilt K, Bachmann M. Microwave effect on diffusion: A possible mechanism for non-thermal effect [J]. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 2015, 34(4): 327-333
- [37] 石海信, 方丽萍, 王爱荣, 王晓丽. 微波辐射下木薯淀粉结构与性质的变化[J]. *食品科学*, 2015, 36(3): 68-74
- [38] 陈培栋. 微波处理对糙米理化性质影响及作用机理研究[D]. 南京:南京财经大学, 2018
- [39] Hódsági M, Jámbor Á, Juhász E. Effects of microwave heating on native and resistant starches[J]. *Acta Alimentaria*, 2012, 41(2): 233-247
- [40] Cai C H, Cai J W, Man J M, Yang Y, Wang Z F, Wei C. Allomorph distribution and granule structure of lotus rhizome C-type starch during gelatinization[J]. *Food Chemistry*, 2014, 142(3): 408-415
- [41] Braşoveanu M, Nemţanu M R. Behaviour of starch exposed to microwave radiation treatment[J]. *Starch- Stärke*, 2014, 66(1-2): 3-14
- [42] Luo Z G, He X W, Xiong F, Luo F X, Gao Q Y. Effect of microwave radiation on the physicochemical properties of normal maize, waxy maize and amyloamylase V starches[J]. *Starch-Stärke*, 2010, 58(9): 468-474
- [43] Zhang J, Chen F, Liu F, Wang Z W. Study on structural changes of microwave heat-moisture treated resistant *Canna edulis* Ker starch during digestion *in vitro* [J]. *Food Hydrocolloids*, 2010, 24(1): 27-34
- [44] Szepes A, Hasznos-Nezdei M, Kovács J, Funke Z, Ulrich J, Szabó-Révész P. Microwave processing of natural biopolymers-studies on the properties of different starches [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2005, 302(1): 166-171
- [45] 康思健, 贾祥泽, 郑少婷, 孙思薇, 陈靖妍, 郭泽滨. 淀粉颗粒微观结构及结晶调控技术的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(19): 322-328
- [46] Fan D M, Wang L Y, Shen H J, Huang L L, Zhao J X, Zhang H. Ultrastructure of potato starch granules as affected by microwave treatment[J]. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20(S3): 189-194
- [47] Fan D M, Wang L Y, Chen W, Ma S Y, Ma W R, Liu X M, Zhao J X, Zhang H. Effect of microwave on lamellar parameters of rice starch through small-angle X-ray scattering[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 35(3): 620-626
- [48] Benhamou M. Polymer Physics: From suspension to nanocomposites and beyond[J]. *Contemporary Physics*, 2012, 53(3): 1-2
- [49] Fan D M, Wang L Y, Ma S Y, Ma W R, Liu X M, Huang J L, Zhao J X, Zhang H, Chen W. Structural variation of rice starch in response to temperature during microwave heating before gelatinisation[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 92(2): 1249-1255
- [50] 闫博文, 沈慧杰, 范大明, 吴晔君, 陶源, 王明福. 米淀粉自由体积的微波热响应机制[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(8): 77-85
- [51] 石海信, 罗婷, 李葵, 覃春荣, 黄伍达. 微波辐射对淀粉化学变性反应的影响[J]. *广东化工*, 2015, 42(7): 31-32
- [52] Gani A, Nazia S, Rather S A, Wani S M, Shah A, Bashir M, Masoodi F A, Gani A. Effect of γ -irradiation on granule structure and physicochemical properties of starch extracted from two types of potatoes grown in Jammu and Kashmir, India[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2014, 58(1): 239-246
- [53] Kizil R, Irudayaraj J, Seetharaman K. Characterization of irradiated

- starches by using ft- raman and flir spectroscopy [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(14): 3912-3918
- [54] 胡博, 范大明, 吴晔君, 陶源, 高艺书, 连慧章, 黄略略, 赵建新, 张灏. 水分等典型影响因素对微波场下米蛋白-淀粉复配体系自由基生成及贮藏稳定性的干预[J]. 食品科学, 2017, 38(11): 148-154
- [55] Lin L F, Hu B, Gao Y S, Lian H Z, Zhao J X, Zhang H, Chen W, Huang L L, Fan D M. Effects of the components in rice flour on thermal radical generation under microwave irradiation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 93 (Pt A): 1226-1230
- [56] 刘意骁. 微波热致大米淀粉自由基的生成及稳定性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014
- [57] 刘意骁, 范大明, 王丽云, 连慧章, 赵建新, 张灏. 微波处理淀粉自由基的生长和衰减[J]. 食品科学, 2014, 35(13): 114-117
- [58] Fan D M, Liu Y X, Hu B, Lin L F, Huang L L, Wang L Y, Zhao J X, Zhang H, Chen W. Influence of microwave parameters and water activity on radical generation in rice starch [J]. Food Chemistry, 2016, 196(5): 34-41
- [59] Fan D M, Shen H J, Huang L L, Gao Y S, Lian H Z, Zhao J X. Microwave-absorbing properties of rice starch[J]. Polymers, 2015, 7(9): 1895-1904
- [61] Tang H R, Godward J, Hills B. The distribution of water in native starch granules——a multinuclear NMR study [J]. Carbohydrate Polymers, 2000, 43(4): 375-387
- [62] 高艺书. 微波对水合淀粉体系加热特性影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016
- [63] 高艺书, 范大明, 王丽云, 沈慧杰, 陈妍方, 连慧章, 赵建新, 张灏, 陈卫. 基于 $^1\text{H-NMR}$ 的大米淀粉与马铃薯淀粉水合过程的水状态及分布差异研究[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(5): 93-98
- [64] 马申嫣, 范大明, 王丽云, 连慧章, 赵建新, 张灏. 微波加热对马铃薯淀粉颗粒内部水状态及分布的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(5): 219-225

Effect of Thermal and Non-thermal Effects Under Microwave Treatment on Starch Properties

LIU Hao GU Fengying LIU Ziyi WANG Bolun ZHANG Fan
YANG Tingting WANG Feng*

(Institute of Agro-products Processing Sciences and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences/
Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193)

Abstract: As an electromagnetic wave of small wavelength, microwave has a strong medium penetrating ability, which increases the temperature of the internal and external materials at the same time. It has many advantages in treating starchy food, such as high thermal efficiency, strong controllability and space saving. This paper not only introduced the thermal and non-thermal of microwave effects during starch gelatinization, but also summarized new methods of studying microwave non-thermal effects. The differences in the properties was compares, including the appearance, the crystal structure, the molecular structure and thermal properties of starch between starch gelatinization with microwave and heat transfer treatment. The response of water in starch emulsion by microwave treatment also was discussed. This paper could provide a theoretical reference to the in-depth studies on the impact of microwave treatment on starch gelatinization in food as well as on the development and utilization of the microwave gelatinized of starch.

Keywords: microwave thermal effect, microwave non-thermal effect, starch gelatinization, starch structure