

水力空化改性对玉米淀粉聚集态结构的影响

黄玉娟, 王昊翊, 黄永春, 黄承都

Effect of Hydraulic Cavitation Modification on the Aggregation Structure of Corn Starch

HUANG Yujuan, WANG Haoyi, HUANG Yongchun, and HUANG Chengdu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080187>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

葡萄籽乙醇提取物对玉米淀粉微观结构及回生性质的影响

Effect of Ethanol Extract of Grape Seed on the Microstructure Structure and Retrogradation Characteristics of Corn Starch

食品工业科技. 2020, 41(11): 46–50

水力空化对果胶粘度的影响及其凝胶色谱表征

Effect of hydrodynamic cavitation on the viscosity of pectin and characterization by gel permeation chromatography

食品工业科技. 2017(21): 65–68

不同直链淀粉含量玉米淀粉挤出物的酶解力与糊化度研究

Enzymatic hydrolysis and gelatinization degree of extruded corn starch with different amylose content

食品工业科技. 2018, 39(10): 1–6

基于高效液相色谱法分析水力空化对蔗糖的影响

Analyze the influence of hydrodynamic cavitation on sucrose by high performance liquid chromatography

食品工业科技. 2017(01): 189–192

三种玉米淀粉对微波复热鸡米花品质特性的影响

Effect of three kinds of corn starch on the quality characteristics of microwave–reheating chicken popcorn

食品工业科技. 2017(21): 52–55

玉米淀粉在离子液体中流变学特性的研究

Study on rheological properties of corn starch in the ionic liquid

食品工业科技. 2017(03): 113–117



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄玉娟, 王昊翊, 黄永春, 等. 水力空化改性对玉米淀粉聚集态结构的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 111–116. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080187

HUANG Yujuan, WANG Haoyi, HUANG Yongchun, et al. Effect of Hydraulic Cavitation Modification on the Aggregation Structure of Corn Starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 111–116. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080187

· 研究与探讨 ·

水力空化改性对玉米淀粉聚集态结构的影响

黄玉娟^{1,2}, 王昊翊^{1,2}, 黄永春^{1,2}, 黄承都^{1,2}

(1. 广西糖资源绿色加工重点实验室(广西科技大学), 广西柳州 545006;

2. 蔗糖产业省部共建协同创新中心, 广西南宁 530004)

摘要:为了探究水力空化改性对玉米淀粉聚集态结构及物化性质的影响, 本实验以玉米淀粉为研究对象, 分别对其进行 10、20、30、40、50 min 的水力空化处理, 并对处理后玉米淀粉的粒径分布、微观形貌结构、结晶结构、分子短程有序结构、膨胀力以及溶解度进行测定。结果表明: 水力空化处理淀粉后, 玉米淀粉颗粒的平均粒径增大, 淀粉颗粒的表面出现圆锥形的裂缝和不均匀分布的圆形小孔, 相对结晶度由 22.25% 增加至 29.23%, 分子短程有序程度先增大后降低, 膨胀力由 $9.87 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加至 $13.10 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 溶解度由 8.94% 增加至 11.76%。水力空化产生空化效应可以改变玉米淀粉的聚集态结构。

关键词:玉米淀粉, 水力空化, 改性, 聚集态结构

中图分类号: TS235.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)08-0111-06

DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2021080187](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080187)

本文网刊:



Effect of Hydraulic Cavitation Modification on the Aggregation Structure of Corn Starch

HUANG Yujuan^{1,2}, WANG Haoyi^{1,2}, HUANG Yongchun^{1,2}, HUANG Chengdu^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Green Processing of Sugar Resources (Guangxi University of Science and Technology), Liuzhou 545006, China;

2. Province and Ministry Co-sponsored Collaborative Innovation Center of Sugarcane and Sugar Industry, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to explore the influence of hydraulic cavitation modification on the aggregate structure and physicochemical properties of corn starch, this experiment took corn starch as the research object, and treated it with hydraulic cavitation for 10, 20, 30, 40 and 50 min, respectively. After treatment, the particle size distribution, microscopic morphology structure, crystalline structure, molecular short-range order structure, the swelling power and solubility of corn starch were tested. The results showed that after hydrodynamic cavitation treatment of starch, the average particle size of corn starch granules increased, conical cracks and unevenly distributed circular pores appeared on the surface of starch granules, and the relative crystallinity increased from 22.25% to 29.23%. The degree of molecular short-range order first increased and then decreased, the swelling power increased from $9.87 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ to $13.10 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, and the solubility increased from 8.94% to 11.76%. The cavitation effect produced by hydraulic cavitation could change the aggregated structure of corn starch.

Key words: corn starch; hydraulic cavitation; modification; aggregated structure

玉米富含多种维生素和矿物质等^[1], 是生产改性淀粉、面食和高糖糖浆等产物的原材料^[2-4]。淀粉作为一种天然的聚合物, 具有多种优异的性能, 比如价

格低廉、可生物降解性和生物相容性等, 被广泛应用于食品加工中。从自然界的农作物中提取后制备得到的淀粉统称为原淀粉^[5]。原淀粉存在许多缺陷, 比

收稿日期: 2021-08-19

基金项目: 国家自然科学基金 (31660472)。

作者简介: 黄玉娟 (1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 生物资源加工及过程强化, E-mail: 15767629500@163.com。

如口感比较差、粘度不一致、容易变稀、容易老化、冷水不溶解和凝胶能力比较差等^[6]，这些缺陷在很大程度上限制了原淀粉的应用。为了充分利用原淀粉的优良性质、克服原淀粉的缺陷和拓宽原淀粉的应用范围，需要对原淀粉进行改性。

目前淀粉的改性方法主要有物理法、化学法、酶法或复合法^[7-11]。通过改变淀粉的聚集态结构可以在一定程度上改变淀粉的性能，如可提高淀粉糊的透明度、成膜性以及耐酸耐碱性等。目前，超声波处理已经作为一种环境友好型的物理改性方法被应用到淀粉的生产加工中^[12-14]。超声波处理具有许多优点，如超声能量比较集中、超声效果较好和可作用于各类样品，但是只有 5%~10% 的能量用于超声作用，其余的能量均用来使系统的温度升高。超声处理对能量的利用率较低，在实现大规模处理方面还存在很大缺陷^[15]。类似超声的作用效应也可以在液压体系的水力空化处理中实现。水力空化是当液体内部的局部压力降低时，液体内部或液固界面上蒸汽或空泡的形成、发展和溃灭的过程^[16-18]。水力空化所形成的空泡与液体一起做整体运动，可在较大范围内形成一个比较均匀的空化强化场，能量利用率高。相比于超声处理，水力空化具有耗能低、能效高和处理量大等特点，更加具有大规模工业化应用的优势^[19]，而且水力空化在淀粉改性方面目前还鲜见报道。本实验利用耗能低、能效高和处理量大的水力空化装置处理玉米淀粉，探究水力空化对玉米淀粉聚集态结构及物化性质的影响，开发新的淀粉改性技术。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

玉米淀粉 食品级，河北古松农副产品有限公司；KBr 分析纯，广东光华科技股份公司。

101-3AB 电热鼓风干燥箱 天津市泰斯特仪器有限公司；SZT-15T 手动粉末压片机 天津市众拓科技发展有限公司；65L-1010 激光颗粒分布测量仪

辽宁仪表研究所有限公司；DM2000 LED 数码显微镜 Leica 有限公司；Duantier 扫描电子显微镜 美国 FEI 公司；D8 AdvanceX-射线衍射仪 德国布鲁克公司；INVENIO R 傅里叶红外光谱仪 布鲁克(北京)科技有限公司；H1850 离心机 Cence 湘仪有限公司。

水力空化装置由实验室自制，主要由压力表、离心泵、空化器、储液罐和阀门等组成，如图 1 所示。空化器为文丘里管，主要由喉部长度、喉部直径、入口直径、出口直径、进口角度、出口角度等组成，其结构示意图如图 2 所示。

1.2 实验方法

1.2.1 样品的制备 用电子天平准确称取 450.0 g 干燥的玉米淀粉，加入 3000 mL 去离子水配制成浓度为 15% (w/v) 的玉米淀粉乳，用水力空化装置处理玉米淀粉乳 0、10、20、30、40、50 min，抽滤(淀粉的

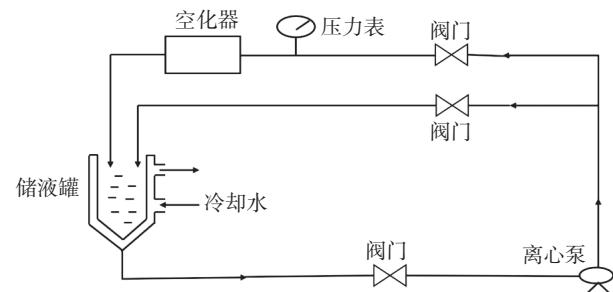


图 1 水力空化装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of hydraulic cavitation device

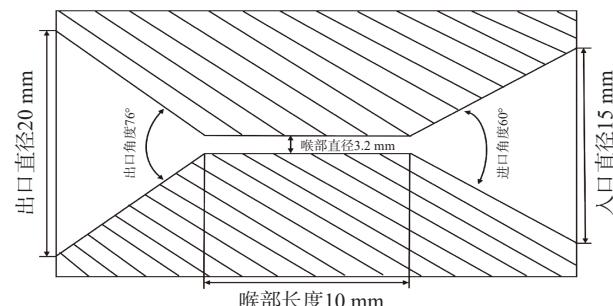


图 2 文丘里管结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of venturi tube structure

水分含量约为 43.57%)，于鼓风干燥箱中 40 °C 干燥 8 h (淀粉的水分含量约为 12.43%)，研磨，过 80 目筛，装入密封袋待用。

1.2.2 粒径分布的测定 使用全自动激光颗粒分布测量仪测定不同空化处理时间玉米淀粉颗粒的粒径分布。测量范围为 0.1~600 μm，激光光源为 670 nm 激光固体光源，分散剂为去离子水。用滴管取适量的 1% (w/v) 淀粉乳于样品池中进行淀粉颗粒的粒径分布的检测。

1.2.3 微孔结构的观察 用玻璃棒蘸取适量的淀粉乳点涂在干净的载玻片上，并用盖玻片盖住，在目镜 10 倍数和物镜 40 倍数下观察水力空化处理前后玉米淀粉的微孔结构。

1.2.4 微观形貌结构的观察 取适量的玉米淀粉样品均匀涂在贴有导电双面胶的样品台上，先用除尘器除去表面松散的样品颗粒及灰尘，在离子溅射镀膜仪中镀金 30 s，再取出放入扫描电子显微镜样品室中进行观察不同处理时间后玉米淀粉颗粒的微观形貌结构。工作电压为 10 kV，观察倍数为 5000 倍。

1.2.5 X-射线衍射的检测 参照王宏伟等^[20]方法并稍作修改。取适量的玉米淀粉粉末样品于玻璃圆形凹槽内，使用光滑的玻片压平压实，送入 X 射线衍射仪中进行检测。检测条件：管压 40 kV，管流 40 mA，扫描区域 5°~30°，扫描速率为 1°/min，步长为 0.02°。使用 Origin 2018 软件作图和计算相对结晶度(相对结晶度=衍射峰面积/总面积)。

1.2.6 傅里叶变换红外光谱的检测 使用分析天平准确称取 0.01 g 淀粉样品和 1.0 g KBr 粉末于玛瑙

研钵中, 混合均匀并研细, 压片, 压片厚度约为 0.3 mm, 用傅里叶变换红外光谱对样品进行检测。检测条件: 扫描波数范围为 4000~400 cm⁻¹, 分辨率为 4 cm⁻¹, 采用 DTGC 检测器, 以空气为空白检测背景, 扫描 32 次后得到样品的红外光谱图, 使用 Origin 2018 软件作图和计算 $R_{1047\text{cm}^{-1}/1022\text{cm}^{-1}}$ 值。

1.2.7 膨胀力和溶解度的检测 参照王宏伟等^[21]方法并稍作修改。准确称取 0.3 g 干燥后的玉米淀粉于烧杯中, 加入适量去离子水配制成 10 mL 质量分数为 3% (w/v) 的淀粉乳溶液, 将淀粉乳溶液置于 90 °C 水浴中搅拌加热 30 min, 在 8000 r/min 条件下离心 30 min 后取出, 分离上清液和沉淀, 称量沉淀并将其质量记为 M_2 ; 将上清液倒于烘干的蒸发皿中, 放入 105 °C 烘箱烘干至恒重, 质量记为 M_1 。按照下列公式计算淀粉样品的膨胀力和溶解度。

$$\text{膨胀力} = M_2 / (M - M_1)$$

$$\text{溶解度} = (M_1 / M) \times 100\%$$

式中: M 为干玉米淀粉的质量, g; M_1 为上清液烘干后物质的质量, g; M_2 为沉淀的质量, g。

1.3 数据处理

所有实验平行 3 次以上, 采用平均值±标准差表示, 用 Excel 2019 软件构建数据库, 通过 Origin 2018 软件作图, 统计分析采用 SPSS 26.0 软件, 方差分析采用 Duncan 多重比较法进行显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 水力空化改性对玉米淀粉粒径分布的影响

由图 3 可知, 水力空化处理后玉米淀粉的粒径参数 $d_{0.1}$ 、 $d_{0.5}$ 、 $d_{0.9}$, 水力空化处理后的玉米淀粉显示出其粒度的增加, 随着空化处理时间的增加, 粒径大小先增大后减小, 其中水力空化处理 30 min 时, 玉米淀粉的粒径变化最大, 相比于原淀粉, 粒径总体上均有向更大粒度移动的趋势, 原因可能是在空化处理时间小于 30 min 时, 水力空化产生机械作用使大的玉米淀粉颗粒破碎成小颗粒, 微小的淀粉碎片重新聚集

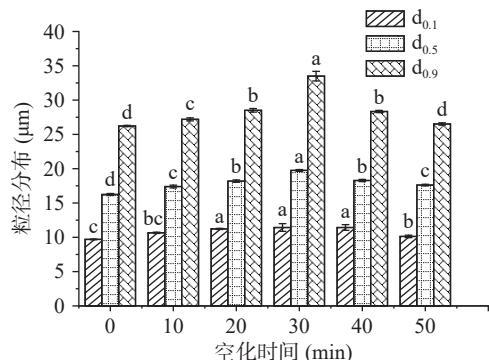


图 3 水力空化处理时间对玉米淀粉粒径分布的影响

Fig.3 Effect of hydraulic cavitation treatment time on grain size distribution of corn starch

注: $d_{0.1}$ 、 $d_{0.5}$ 、 $d_{0.9}$ 分别表示 10%、50%、90% 的玉米淀粉颗粒小于该数值; 小写英文字母 (a, b, c, d) 不同表示存在显著性差异 ($P < 0.05$); 表 1~表 2 同。

成新的颗粒或者粘附在其他淀粉颗粒的表面, 从而导致玉米淀粉颗粒的粒径增大, 在空化处理时间大于 30 min 时, 新聚集的颗粒或者黏附在淀粉表面的颗粒有一小部分在水力空化产生的机械作用力下被分散, 导致空化处理大于 30 min 后淀粉的粒径开始减小, 但总体上水力空化处理淀粉后粒径呈增大的趋势。Wang 等^[22] 在超声波处理玉米淀粉中也得出淀粉颗粒增大的实验结果。

2.2 水力空化改性对玉米淀粉微孔结构的影响

图 4 为玉米淀粉经过水力空化处理前后玉米淀粉的数码显微镜图。原玉米淀粉为不规则的多边形, 非尖锐稍带圆形角。由图 4 可得原玉米淀粉颗粒多为多角体, 有多个平面和棱角, 中心位置有明显的黑色的点, 这是玉米淀粉的脐点。原玉米淀粉的表面圆滑平整, 在经过水力空化处理后, 大部分玉米淀粉颗粒在中心位置会形成圆锥形的裂缝, 其破损程度随水力空化处理时间延长而逐渐增大, 其原因可能是水力空化产生的机械力冲击和局部的热点效应使玉米淀粉的表面形成圆锥形的裂缝^[23], 这些裂缝可能会增大玉米淀粉与其他物质的接触面积^[24], 比如增大与水

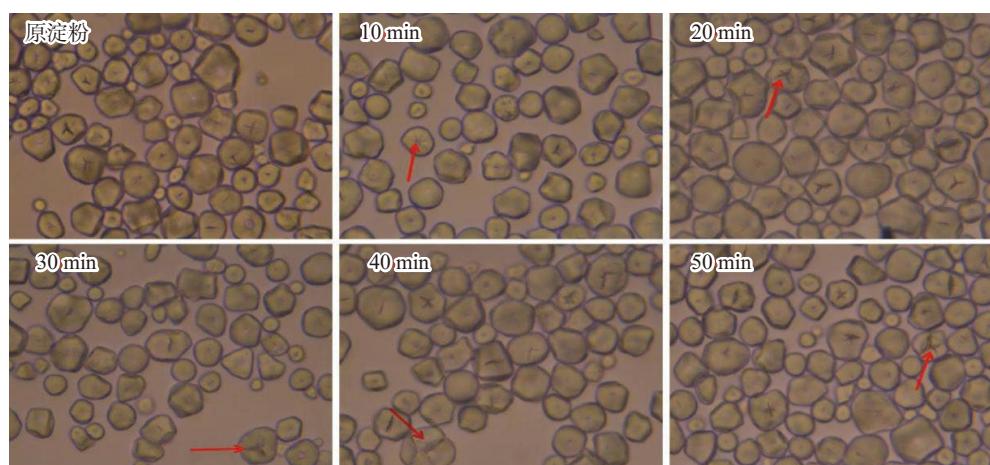


图 4 水力空化处理前后玉米淀粉的数码显微镜图(目镜 10×, 物镜 40×)

Fig.4 Digital micrograph of corn starch before and after hydraulic cavitation treatment (eyepiece 10×, objective 40×)

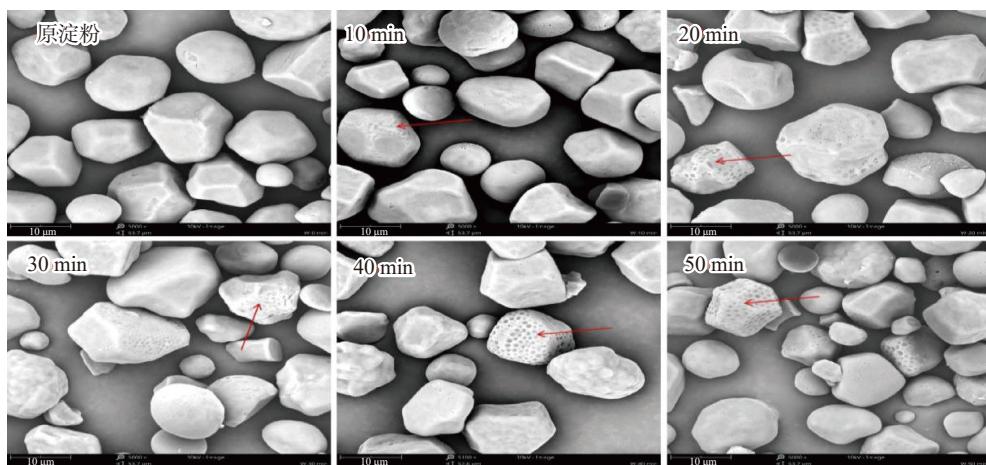


图 5 水力空化处理前后玉米淀粉的扫描电镜图(5000×)

Fig.5 SEM images of corn starch before and after hydraulic cavitation treatment(5000×)

子接触面积,增强淀粉的吸水作用。

2.3 水力空化改性对玉米淀粉微观形态结构的影响

由图 5 可知,原玉米淀粉多为不规则的多边形,少部分为球形,颗粒大小不一致,表面较光滑完整,且无孔洞,无裂纹。经过水力空化处理后,玉米淀粉颗粒形状没有发生改变,与数码显微镜观察的结果一致,但其表面出现一定量不均匀分布的圆形小孔和裂缝,随着水力空化处理时间的增加,出现更多和更大的圆形小孔,说明水力空化处理更容易影响淀粉颗粒的表面特征,而不是其颗粒大小,原因可能是水力空化处理过程中空化气泡快速形成和破裂产生的高剪切力和机械力,从而导致玉米淀粉表面形态结构的破坏,此外,在超声改性淀粉中,淀粉颗粒表面也产生类似不均匀分布的圆形小孔和裂缝^[25]。

2.4 水力空化改性对玉米淀粉结晶结构的影响

天然的玉米淀粉颗粒都是以半晶态的形式存在,具有结晶结构和无定形结构。淀粉的结晶结构可以通过 X 射线衍射仪图谱表征。支链淀粉以双螺旋结构形成结晶结构,结晶区域的结构较为紧密,一般不易受到化学试剂或者外力影响,在衍射图谱上表现为尖锐的衍射峰。直链淀粉分子以松散的结构形成淀粉的无定形结构,无定形结构容易受化学试剂或外力影响,在衍射图谱上表现为分散的衍射区域^[26-27]。原玉米淀粉为谷类淀粉,其的结晶类型为 A 型^[28]。如图 6 可知,水力空化处理前后的玉米淀粉在 X-射线衍射仪图谱上均表现为 A 型,即衍射角为 20 时,在 15°、17°、18° 和 23° 附近出现有明显的尖锐衍射峰,结果表明水力空化处理并不会改变玉米淀粉的结晶类型。由表 1 可知玉米淀粉相对结晶度随空化时间的变化情况,原淀粉的相对结晶度为 22.25%,水力空化处理淀粉后,相对结晶度呈增大的趋势,其中空化处理 50 min 时,相对结晶度最大为 29.23%,这可能是水力空化作用产生的空化效应优先作用于无定形区,无定形区域中淀粉链的断裂使得一些断裂链的重新排序后会产生更加紧密的结晶结构^[29],最终导致

玉米淀粉相对结晶度增加,且随着空化时间的增加,水力空化产生的空化效应作用于无定形区的效果越强。

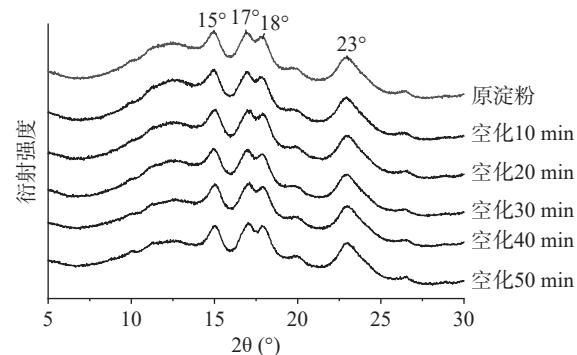


图 6 水力空化处理前后玉米淀粉的 X-射线衍射图谱

Fig.6 X-ray diffraction pattern of corn starch before and after hydraulic cavitation treatment

表 1 水力空化处理前后玉米淀粉的相对结晶度和 $R_{1047 \text{ cm}^{-1}/1022 \text{ cm}^{-1}}$ 值Table 1 Relative crystallinity and $R_{1047 \text{ cm}^{-1}/1022 \text{ cm}^{-1}}$ values of corn starch before and after hydraulic cavitation treatment

样品	相对结晶度(%)	$R_{1047 \text{ cm}^{-1}/1022 \text{ cm}^{-1}}$
原淀粉	22.25±1.9 ^b	0.933±0.019 ^{ab}
空化 10 min	23.87±2.0 ^b	0.938±0.027 ^{ab}
空化 20 min	24.08±1.4 ^b	0.946±0.031 ^{ab}
空化 30 min	26.89±1.4 ^b	0.957±0.010 ^a
空化 40 min	26.87±3.0 ^{ab}	0.925±0.006 ^{ab}
空化 50 min	29.23±1.6 ^a	0.913±0.016 ^b

注: $R_{1047 \text{ cm}^{-1}/1022 \text{ cm}^{-1}}$ 为波数为 1047 和 1022 cm^{-1} 处的吸收峰的强度比值。

2.5 水力空化改性对分子短程有序结构的影响

可以利用红外光谱可以对淀粉的种类进行定性分析,在波数为 1200~800 cm^{-1} 的光谱范围内,傅立叶变换红外光谱对淀粉短程有序的分子结构变化很敏感,在波数为 1047 cm^{-1} 处的红外吸收峰是淀粉结晶区的结构特征,可以用来表示淀粉分子的短程有序结构,而在波数为 1022 cm^{-1} 处的红外吸收峰则是淀

粉无定形区的结构特征。在波数为 1047 和 1022 cm^{-1} 处的吸收峰的强度比值 $R_{1047 \text{ cm}^{-1}/1022 \text{ cm}^{-1}}$ 可以反映淀粉分子短程有序结构的有序化程度^[30]。由图 7 可知, 水力空化处理前后的玉米淀粉出峰的位置一样, 即在波数约为 3414 cm^{-1} 处有-OH 键振动, 在波数约为 2929 cm^{-1} 处有饱和 C-H 键振动, 且峰形变尖锐, 在波数约为 1157 cm^{-1} 处有 C-O 键振动, 在波数约为 1012 cm^{-1} 处有 C-O-H 键振动, 表明水力空化处理玉米淀粉没有改变淀粉的分子基团或者化学组成。由表 1 可知, 原淀粉的 $R_{1047 \text{ cm}^{-1}/1022 \text{ cm}^{-1}}$ 值为 0.933, 水力空化处理玉米淀粉后, 玉米淀粉 $R_{1047 \text{ cm}^{-1}/1022 \text{ cm}^{-1}}$ 值先逐渐增大后降低, 在空化时间为 30 min 时, $R_{1047 \text{ cm}^{-1}/1022 \text{ cm}^{-1}}$ 值达到最大为 0.957, 原因可能是在 30 min 内, 水力空化处理在无定形区产生紧密堆积密度的双螺旋^[31], 导致分子的短程有序程度的增加。随着空化时间的增加, 水力空化处理同时也会破坏结晶区支链淀粉的双螺旋结构^[32], 且破坏程度更加剧烈, 导致分子的短程有序程度的降低。此外, 发现空化 30 min 时, 淀粉分子的短程有序程度最大, 空化时间 50 min 时, 淀粉的相对结晶度最大, 淀粉分子的短程有序程度与相对结晶度两者间的变化趋势并不完全一致。

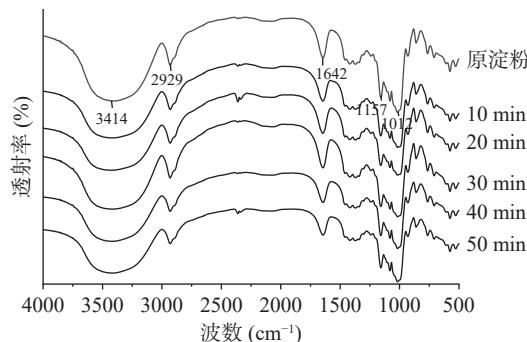


图 7 水力空化处理前后玉米淀粉的红外谱图

Fig.7 Infrared spectra of corn starch before and after hydraulic cavitation treatment

2.6 水力空化改性对膨胀力和溶解度的影响

淀粉的吸水性在淀粉类食品加工中具有重大的意义, 膨胀力和溶解度的大小可以反映出淀粉的吸水性。表 2 为水力空化处理前后玉米淀粉的膨胀力和溶解度。由表 2 可知, 水力空化处理后的玉米淀粉与原淀粉相比, 随着空化时间的增加, 膨胀力和溶解度均呈现逐渐增大的趋势, 在空化时间为 50 min 时膨胀力和溶解度均达到最大, 空化时间为 50 min 时, 淀粉的膨胀力由 9.87 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加为 13.10 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 溶解度由 8.94% 增加为 11.76%, 可能是由于水力空化处理玉米淀粉后, 玉米淀粉的无定形结构变得松散, 同时由扫描电镜图可知水力空化处理后, 淀粉颗粒表面出现圆形小孔和裂缝, 结构的松散、圆形小孔和裂缝可能促进了淀粉分子与水分子的接触作用, 且随着空化时间的增加, 淀粉的形貌结构被破坏程度越大, 淀粉分子与水分子的接触作用更强, 从而使淀粉

表 2 水力空化处理前后玉米淀粉的膨胀力和溶解度

Table 2 Expansion force and solubility of corn starch before and after hydraulic cavitation treatment

样品	膨胀力($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	溶解度(%)
原淀粉	9.87±0.40 ^b	8.94±0.70 ^c
空化 10 min	10.28±1.64 ^b	9.80±0.40 ^{bc}
空化 20 min	10.58±0.34 ^b	10.15±0.63 ^{ab}
空化 30 min	11.90±1.88 ^{ab}	10.38±1.37 ^{ab}
空化 40 min	12.09±0.24 ^{ab}	11.00±0.19 ^{ab}
空化 50 min	13.10±1.44 ^a	11.76±1.57 ^a

的膨胀力和溶解度随时间的增加而逐渐增大。

3 结论

水力空化产生的空化效应可以改变玉米淀粉的聚集体结构, 改善淀粉的物化性质。经水力空化处理后, 淀粉的平均粒径呈增大的趋势; 淀粉颗粒的表面出现圆锥形的裂缝和分布不均匀的圆形小孔; 相对结晶度增加和短程有序程度先增加后降低, 此外, 淀粉分子的短程有序的变化与相对结晶度的变化并不完全一致; 膨胀力和溶解度随处理时间增加而逐渐增大。本实验尚未对淀粉热力学特性、糊化特性以及质构特性等进行研究, 下一步的实验可以先探索水力空化改性对淀粉热力学特性、糊化特性以及质构特性的影响, 以便在淀粉改性中更全面地应用水力空化技术。

参考文献

- [1] PALANISAMY C P, CUI B, ZHANG H X, et al. A comprehensive review on corn starch-based nanomaterials: Properties, simulations, and applications[J]. *Polymers*, 2020, 12(9): E2161.
- [2] 马先红, 张文露, 张铭鉴. 玉米淀粉的研究现状[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(2): 4–6. [MA X H, ZHANG W L, ZHANG M J. Research status of corn starch[J]. *Cereals & Oils*, 2019, 32(2): 4–6.]
- [3] 张江宁, 丁卫英, 张玲, 等. 糯玉米淀粉在食品中应用的研究进展[J]. 农产品加工, 2019(11): 87–88. [ZHANG J N, DING W Y, ZHANG L, et al. Research progress on the application of waxy corn starch in food[J]. *Farm Products Processing*, 2019(11): 87–88.]
- [4] 宋洋. 玉米淀粉糖的潜在应用[J]. 中国化工贸易, 2018, 10(5): 128. [SONG Y. Potential application of corn starch sugar[J]. *China Chemical Trade*, 2018, 10(5): 128.]
- [5] 羊云龙, 金晓亮. 变性玉米淀粉的性质及其应用研究[J]. 种子科技, 2018, 36(5): 83. [YANG Y L, JING X L. Study on properties and application of modified maize starch[J]. *Seed Science & Technology*, 2018, 36(5): 83.]
- [6] 刘张虎. 关于变性淀粉在食品工业中的应用思考[J]. 科技展望, 2015, 25(22): 242. [LIU Z H. Thinking about the application of modified starch in food industry[J]. *Technology Outlook*, 2015, 25(22): 242.]
- [7] 曹英, 夏文, 王飞, 等. 物理改性对淀粉特性影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(21): 315–319, 325. [CAO Y, XIA W, WANG F, et al. Research progress on the effect of physical

- modification on starch properties[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(21): 315–319,325.]
- [8] DAS A N, SIT N D. Modification of taro starch and starch nanoparticles by various physical methods and their characterization[J]. *Starch-Stärke*, 2021, 73(5-6): 2000227.
- [9] 孙亚东, 陈启凤, 吕闪闪, 等. 淀粉改性的研究进展[J]. *材料导报*, 2016(21): 68–74. [SUN Y D, CHEN Q F, LU S S, et al. Recent progress in modification of starch[J]. *Materials Review*, 2016(21): 68–74.]
- [10] VAMADEVAN V, BERTOFT E. Observations on the impact of amylopectin and amylose structure on the swelling of starch granules[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 103: 105663.
- [11] 徐忠, 周美琴, 吴艳华, 等. 复合变性对淀粉性质的影响研究[J]. *食品工业科技*, 2008(1): 282–285. [XU Z, ZHOU M Q, WU Y H, et al. Study on effect of combination modified on starch[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2008(1): 282–285.]
- [12] 陈海明. 超声对玉米淀粉聚集态结构的影响及其辅助化学改性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. [CHEN H M. The influence of ultrasonic on aggregation state structure of corn starch and assist of chemical modification[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.]
- [13] FALSAFI S R, MAGHSOUDLOU Y, ROSTAMABADI H, et al. Preparation of physically modified oat starch with different sonication treatments[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89(1): 311–320.
- [14] MONROY Y, RIVERO S, MA G. Microstructural and techno-functional properties of cassava starch modified by ultrasound[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 42(1): 795–804.
- [15] 沈壮志, 林书玉. 声场中水力空化泡的动力学特性[J]. *物理学报*, 2011, 60(8): 385–394. [SHEN Z Z, LIN S Y. Dynamical behaviors of hydrodynamic cavitation bubble under ultrasound field[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(8): 385–394.]
- [16] 沈壮志, 柳楠. 文丘里管反应器空化泡的动力学特性[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(1): 23–28. [SHEN Z Z, LIU N. Bubble dynamical behaviors in the venturicavitation reactor[J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2012, 40(1): 23–28.]
- [17] KADIVAR E, TIMOSHEVSKIY M V, NICHIK M Y, et al. Control of unsteady partial cavitation and cloud cavitation in marine engineering and hydraulic systems[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(5): 1–19.
- [18] SUSLICK K S, EDDINGSAAS N C, FLANNIGAN D J, et al. Extreme conditions during multibubble cavitation: Sonoluminescence as a spectroscopic probe[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(4): 842–846.
- [19] ASAITHAMBI N, SINGHA P, DWIVEDI M, et al. Hydrodynamic cavitation and its application in food and beverage industry: A review[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2019, 42(5): e13144.
- [20] 王宏伟, 丁江涛, 张艳艳, 等. 湿热处理对薏米淀粉聚集态结构及糊化特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(17): 111–117. [WANG H W, DING J T, ZHANG Y Y, et al. Impact of heat moisture treatment on the aggregation structure and pasting behavior of adlay starch[J]. *Food Science*, 2020, 41(17): 111–117.]
- [21] 王宏伟, 肖乃勇, 马颖. 超声处理时间对小麦淀粉聚集态结构及理化性能的影响[J]. *轻工学报*, 2019, 34(5): 10–19. [WANG H W, XIAO N Y, MA Y. Effect of ultrasonic treatment time on aggregation structure and physicochemical properties of wheat starch[J]. *Journal of Light Industry*, 2019, 34(5): 10–19.]
- [22] WANG H W, XU K, MA Y, et al. Impact of ultrasonication on the aggregation structure and physicochemical characteristics of sweet potato starch[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 63: 104868.
- [23] 张健东, 孙三祥, 乔慧琼. 水力空化技术的研究及其应用[J]. *环境科学与管理*, 2007(5): 65–69. [ZHANG J D, SUN S X, QIAO H Q. The application and study of hydrodynamic cavitation[J]. *Environmental Science and Management*, 2007(5): 65–69.]
- [24] 扶雄, 黄强. 食用变性淀粉[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2016. [FU X, HUANG Q. Modified starch in food[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2016.]
- [25] 胡爱军, 李倩, 郑捷, 等. 双频超声对红薯淀粉结构和性质的影响[J]. *高校化学工程学报*, 2014, 28(2): 370–375. [HU A J, LI Q, ZHENG J, et al. Effects of dual-frequency ultrasound on structure and properties of sweet potato starch[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2014, 28(2): 370–375.]
- [26] 陈翠兰, 张本山, 陈福泉. 淀粉结晶度计算的新方法[J]. *食品科学*, 2011, 32(9): 68–71. [CHEN C L, ZHANG B S, CHEN F Q. A novel method for calculating starch crystallinity[J]. *Food Science*, 2011, 32(9): 68–71.]
- [27] 徐斌, 满建民, 韦存虚. 粉末 X 射线衍射图谱计算植物淀粉结晶度方法的探讨[J]. *植物学报*, 2012, 47(3): 278–285. [XU B, MAN J M, WEI C X. Methods for determining relative crystallinity of plant starch X-ray powder diffraction spectra[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2012, 47(3): 278–285.]
- [28] 杨景峰, 罗志刚, 罗发兴. 淀粉晶体结构研究进展[J]. *食品工业科技*, 2007(7): 240–243. [YANG J F, LUO Z G, LUO F X. Research progress on crystal structure of starch[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2007(7): 240–243.]
- [29] PAMELA C, FLORES S, CESAR A, et al. *In vitro* digestibility of ultrasound-treated corn starch[J]. *Starch-tä rke*, 2017, 69(9–10): 1700040.
- [30] SEVENOU O, HILL S E, FARHAT I A, et al. Organisation of the external region of the starch granule as determined by infrared spectroscopy[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2002, 31(1–3): 79–85.
- [31] DING Y B, XIAO Y W, OUYANG Q F, et al. Modulating the *in vitro* digestibility of chemically modified starch ingredient by a non-thermal processing technology of ultrasonic treatment[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 70: 105350.
- [32] 贾淑玉, 张百汝, 李杰, 等. 湿热处理对山药粉理化及结构性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(7): 22–26. [JIA S Y, ZHANG B R, LI J, et al. Effect of heat moisture treatment on physicochemical and structural properties of yam flour[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(7): 22–26.]