

# 蒸汽爆破处理对籼米淀粉分子结构的影响

李光磊<sup>1</sup>, 张国丛<sup>2</sup>, 刘本国<sup>1</sup>, 李飞<sup>1</sup>, 马汉军<sup>1</sup>, 孙俊良<sup>1</sup>

(1. 河南科技学院食品学院, 河南新乡 453003) (2. 石家庄市农林科学研究院, 河北石家庄 050041)

**摘要:** 本文研究了蒸汽爆破作用强度对籼米淀粉分子结构的影响。采用蒸汽爆破的方法对籼米淀粉进行处理, 利用凝胶色谱、紫外光谱和红外光谱等分析手段研究汽爆压力、维压时间和淀粉样品水分含量对籼米淀粉分子结构的影响。结果表明, 籼米淀粉经蒸汽爆破处理后, 随着爆破压力、爆破时间以及样品水分含量的增加, 籼米淀粉分子量下降, 短链片段所占比例增加, 中间级吸收峰逐渐消失; 汽爆处理后的籼米淀粉分子链聚合度降低, 紫外光谱最大吸收波长发生蓝移现象; 随着汽爆强度增加, 淀粉分子链断裂产生的醛基增多, 红外光谱 1650 cm<sup>-1</sup>处醛基吸收峰强度增大, 有序化结构与无序化结构的比例(结晶指数)变大。研究表明蒸汽爆破技术作为一种预处理方法可以有效的降解籼米淀粉分子链聚合度, 增加淀粉结晶度。

**关键词:** 籼米淀粉; 蒸汽爆破; 淀粉分子结构

文章编号: 1673-9078(2014)7-136-141

## Effect of Steam Explosion Treatment on Starch Molecular Structure of Indica Rice Starch

LI Guang-lei<sup>1</sup>, ZHANG Guo-cong<sup>2</sup>, LIU Ben-guo<sup>1</sup>, LI Fei<sup>1</sup>, MA Han-jun<sup>1</sup>, SUN Jun-liang<sup>1</sup>

(1. School of Food Science, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

(2. Shijiazhuang Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050041, China)

**Abstract:** The influences of steam exploded pressure, retained time, and sample moisture content on starch molecular structure of indica rice starch treated with steam explosion were analyzed by gel chromatography (GPC), ultraviolet-visible spectroscopy (UV), and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). The results showed that, with the increase of steam exploded pressure, retained time, and sample moisture content, molecular weight of indica rice starch were decreased, and the proportion of starch short chain pieces was increased. In addition, the intermediate absorption peak gradually disappeared, and the degree of polymerization of indica rice starch chains was decreased. The maximum absorption wavelength of UV spectrum showed a blue shift. As the intensity of steam explosion treatment increased, the intensity of aldehyde group absorption peak at 1650 cm<sup>-1</sup> in the infrared absorption spectrogram increased, and starch infrared crystallization index (ICI) increased. Steam explosion technology effectively degraded the polymerization degree of indica rice starch chains and increased the crystallinity starch granule.

**Key words:** indica rice starch; steam explosion; starch molecular structure

水稻是我国第一大粮食作物, 常年稻谷产量约占粮食总产量的 40%<sup>[1]</sup>。籼稻是我国南方地区的主要种植品种, 占稻谷产量的 70%左右。随着我国城市化、商品化和市场化长度的提高, 我国粮食消费结构正在逐年变化, 表现为城镇居民优质粳籼米及其产品代替中低品质籼米的消费格局, 因而降低了籼米尤其是早籼米在大米口粮消费中的比重。同时由于早籼米直链淀粉的含量较高, 使得其粘性低、加工中易产生碎米, 极大限制了早籼米的加工利用和转化增值<sup>[2-3]</sup>。

收稿日期: 2014-04-22

基金项目: 河南省高校科技创新团队支持计划 (13IRTSTHN006)

作者简介: 李光磊 (1970-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为淀粉科学与技术

蒸汽爆破 (Steam Explosion, SE) 是 1928 年由 W H Mason 发展起来的<sup>[4]</sup>, 采用 160~260 °C 饱和水蒸汽加热原料至 0.69~4.83 MPa, 作用时间为几秒到几分钟, 然后骤然减压至大气压的预处理生物质手段。其主要工作原理是将原料置于高温、高压的环境中, 原料被过热液体润胀, 孔隙中充满蒸汽, 当瞬间解除高压时 (毫秒级, 0.00875 秒以内), 原料空隙中的过热液体迅速气化, 体积急剧膨胀而使细胞“爆破”, 细胞壁破裂形成多孔, 小分子物质从细胞内释放<sup>[5-6]</sup>。

蒸汽爆破技术的提出虽已有 80 年的历史, 但多是用用于木质纤维的处理, 实现纤维原料的组分分离与结构变化, 提高纤维素对酶及化学试剂的可及性<sup>[7-8]</sup>。龚凌霄<sup>[9]</sup>将蒸汽爆破技术引入青稞全谷物和青稞麸皮

的加工中,对青稞全谷物的营养和保健作用进行系统研究,首次将汽爆技术应用于谷物食品中。

蒸汽爆破技术由于在处理过程中只需高温蒸气,不添加任何化学物质,即可造成物料发生多种化学物理变化,因此被认为是最具发展前景的生物质资源转换预处理方法。本文利用汽爆技术对籼米淀粉进行处理,采用凝胶色谱、紫外光谱和红外光谱等分析手段考察汽爆强度(爆破压力和维压时间)和淀粉样品水分含量对淀粉分子结构的影响,为籼米淀粉精深加工中汽爆技术的应用提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

早籼米:湖北丰江米业有限公司;二甲基亚砷、氢氧化钠等均为分析纯;硝酸钠、溴化钾等为色谱纯。

### 1.2 主要仪器设备

QBS-80 型汽爆工艺试验台,河南鹤壁正道重型机械厂;Waters 600 高效凝胶色谱仪,美国 Waters 公司;TENSOR27 傅立叶变换红外光谱仪,德国 Bruker 公司;TU-1810PC 紫外分光光度计,北京普析通用公司;BS124S 电子天平,北京赛多利斯仪器系统有限公司;202-2 型干燥箱,上海一恒科技有限公司;SHA-B 恒温振荡器,常州国华电器有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 籼米淀粉制备

将 50 g 籼米清洗后在 250 mL 蒸馏水中浸泡 18 h,匀浆后进行离心,弃去上层清液,将沉淀与 0.2% 的 NaOH 溶液以 1:5 的比例混匀,置于恒温振荡器中(37 °C)反应 48 h,间隔 24 h 换一次 NaOH 溶液,反应结束后过 100 目筛去粗粒,室温下离心(3000×g, 30 min),弃去上清液,沉淀水洗多次至上层液的 pH 值为中性,淀粉湿块烘干(40 °C),粉碎,过筛(100 目)<sup>[10]</sup>。

#### 1.3.2 籼米淀粉成分测定

水分、脂肪、蛋白质、直链淀粉等籼米淀粉主要成分测定参照国标方法(GB/T 12087-2008, GB/T 22427.3-2008, GB/T 5009.5-2010, GB/T 15683-2008)。

#### 1.3.3 蒸汽爆破处理

将 200 g 籼米淀粉样品加入汽爆缸中,合上盖后,将高温饱和蒸汽通入汽爆缸,使缸内压力至设定压力并保持一定的时间,维压结束后打开气动阀门(阀门打

开时间为 0.00875 s),瞬间泄压的同时完成物料的爆破,收集腔内喷出的物料即为蒸汽爆破后的样品<sup>[9]</sup>。

#### 1.3.4 淀粉分子量的测定

##### 1.3.4.1 淀粉样品溶液的制备

称取 50 mg 籼米淀粉样品(以干基计)溶于 10 mL 90% 的二甲基亚砷溶液中,采用磁力加热搅拌器于 60 °C 下加热搅拌 1 h,得到澄清透明的标样溶液,3000 r/min 离心 20 min,取上清液,经 0.45 μm 的尼龙微孔膜过滤后进行凝胶过滤色谱分析,进样量 100 μL<sup>[11]</sup>。

##### 1.3.4.2 GPC 测定方法

采用 Waters 600 高效凝胶过滤色谱测定籼米淀粉样品的分子量。具体方法如下:色谱柱:Ultrasphere<sup>TM</sup> Linear 300 mm×7.8 mm;流动相:0.1 mol/L 硝酸钠(过 0.22 μm 微滤膜);流速:0.6 mL/min,柱温:45 °C;进样量:10 μL;检测器:2410 差式折光检测器和 Empower 工作站。分别选用 Dextran T-2000 (Mw2000000)、Dextran T-580 (Mw580000)、Dextran T-190 (Mw188000)、Dextran T-70 (Mw70000)、Dextran T-10 (Mw10000)、Dextran T-5 (Mw4600) 作为标准分子量。

##### 1.3.5 淀粉紫外扫描图谱分析

称取淀粉样品 20 mg,加入 0.5 mL 无水乙醇润湿样品,加入 2 mol/mL 的 KOH 溶液 1 mL,使样品充分溶解。加入 10 mL 去离子水,用 0.1 mol/mL 的 HCl 将 pH 调至 6.0~7.0,加水定容至 50 mL。取 10 mL 于 100 mL 容量瓶,加入 80 mL 去离子水和 2 mL I<sub>2</sub>-KI 溶液(2 mg I<sub>2</sub>/mL 和 20 mg KI/mL),定容至 100 mL,立即混匀。用紫外分光光度计扫描,从波长 400 nm~800 nm。

##### 1.3.6 淀粉红外扫描图谱分析

红外扫描图谱采用 KBr 压片法,具体过程为:称取约 2 mg 样品,在红外灯的照射下,置于玛瑙研钵中研磨 4~10 min,再与 150 mg 左右干燥的 KBr 粉末充分混合,继续研磨 2~5 min。将研磨好的混合物粉末倒在硫酸纸上灌注于压模中,抽真空,缓慢除去压力,放入样品架上,置于红外谱仪内全波段扫描,绘出红外光谱图。

## 2 结果与分析

### 2.1 籼米淀粉成分分析

籼米淀粉中主要化学成分含量见表 1。

### 2.2 蒸汽爆破处理对籼米淀粉分子量的影响

籼米淀粉的高效凝胶色谱图见图1。

表1 籼米淀粉主要化学成分表

Table 1 Main chemical compositions of indica rice starch

	水分/%	脂肪/%	蛋白质/%	直链淀粉/%
籼米淀粉	12.57±0.02	0.70±0.00	0.41±0.00	29.25±0.03

注：表中的数值均是占淀粉湿基重，平均值±SD。

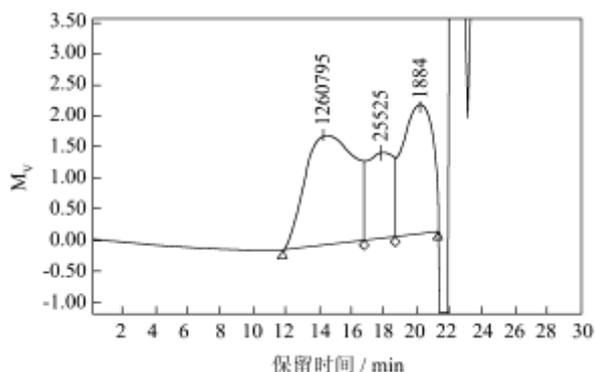


图1 籼米淀粉凝胶过滤色谱图

Fig.1 HPLC gel chromatogram diagram of indica rice starch

由图1可以看出，天然籼米淀粉的主要成分是直链淀粉、中间级分和支链淀粉。由于凝胶色谱中最先洗脱出的是分子量较大的分子，所以先洗脱出的是支链淀粉，随后洗脱出的是中间级分和直链淀粉。

表2 爆破压力对籼米淀粉分子量分布的影响

Table 2 Effect of steam exploded pressure on molecular weight of indica rice starch

爆破压力 /MPa	峰1		峰2		峰3	
	Mw	面积比 /%	Mw	面积比 /%	Mw	面积比 /%
原淀粉	1555415	46.57	32940	19.14	3037	34.29
0.5	1104997	32.74	15817	9.87	2716	57.39
1.0	986285	27.87	-	-	2236	72.13
1.5	750492	15.71	-	-	1921	84.29
2.0	558179	9.89	-	-	1440	90.11

注：维压时间 30S，样品水分含量 12.57%

表3 爆破时间对籼米淀粉分子量分布的影响

Table 3 Effect of steam exploded retained time on molecular weight of indica rice starch

爆破时间/S	峰1		峰2		峰3	
	Mw	面积比 /%	Mw	面积比 /%	Mw	面积比 /%
原淀粉	1555415	46.57	32940	19.14	3037	34.29
10	1307150	40.26	26736	11.81	2873	47.93
30	1185414	35.43	21579	7.19	2797	57.38
60	1031805	26.26	-	-	2622	73.74
90	989276	17.97	-	-	2457	82.03

注：爆破压力 0.8MPa，样品水分含量 12.57%。

将籼米淀粉进行蒸汽爆破处理，以考察爆破压力、爆破时间以及样品水分含量等汽爆参数对籼米淀粉分子量的影响，结果见表2、表3、表4。

表4 样品水分含量对籼米淀粉分子量分布的影响

Table 4 Effect of sample moisture content on molecular weight of indica rice starch

水分含量/%	峰1		峰2		峰3	
	Mw	面积比 /%	Mw	面积比 /%	Mw	面积比 /%
原淀粉	1555415	46.57	32940	19.14	3037	34.29
3.29	1266924	39.18	25762	10.97	2851	49.85
12.57	1185574	35.61	21522	7.21	2815	57.18
22.15	1012801	25.43	-	-	2583	74.57

注：爆破压力 0.8MPa，维压时间 30S。

蒸汽爆破具有从分子水平上打破大分子晶格的效果，存在类似酸水解、热降解、类机械断裂、氧键破坏和结构重排等协同作用，原料物理结构和化学成分在加工过程中发生较大的变化。由表2、表3可以看出，籼米淀粉经蒸汽爆破处理后，其淀粉长链、短链以及中间级分的分子量均有较大程度的降低，且随着爆破压力、爆破时间的增加，中间级分的吸收峰峰逐渐消失，长链峰峰面积所占比例减小，短链峰峰面积所占比例增加。这可能是因为蒸汽爆破作用下，淀粉分子 $\alpha$ -1,6糖苷键部分遭到破坏，同时 $\alpha$ -1,4糖苷键也产生裂解，结果产生更多的小分子淀粉，造成淀粉分子量下降。蒸汽爆破作用降解支链淀粉，切断 $\alpha$ -1,6糖苷键，形成新的短直链淀粉，同时长直链淀粉中 $\alpha$ -1,4糖苷键遭到破坏，长直链淀粉形成短直链淀粉，造成短链峰峰面积所占比例增加。

蒸汽爆破处理前物料中的含水率对蒸汽爆破有较大影响，合适的含水率更有利于高压蒸汽渗透至生物质细胞内部，从而提高蒸汽爆破效果。由表4可知，随着样品水分含量由3%增加至20%，籼米淀粉分子量下降，短链片段增加。

### 2.3 蒸汽爆破处理对籼米淀粉紫外吸收光谱

的影响

籼米淀粉经蒸汽爆破处理后，其紫外吸收光谱见图2、图3、图4。

紫外光谱是电子光谱，由电子跃迁作用而产生。这种电子跃迁包括振动跃迁和转动跃迁，紫外光谱不像振动光谱和转动光谱那样细窄，而是宽阔的谱带。淀粉分子的空间构象是由 $\alpha$ -D-葡萄糖残基之间的相对排列方式决定的。由于空间位阻和能量的关系限制

了  $\alpha$ -1,4 糖苷键内旋转自由度, 使得相邻葡萄糖残基的空间排列方式只有寥寥几种。这种情况下, 直链淀粉采取螺旋形结构。链淀粉与脂肪酸或碘形成结晶性的络合物 (V-链淀粉), 碘或有机物分子位于链淀粉螺旋结构的腔中。链淀粉-碘络合物在 620~680 nm 间呈现最大的紫外光谱吸收峰。V-链淀粉络合物的吸收波长与链淀粉的聚合度密切相关。聚合度小于 6 无色, 7~13 为淡红色, 20 为紫色, 30 为蓝紫色, 40 以上为蓝色。

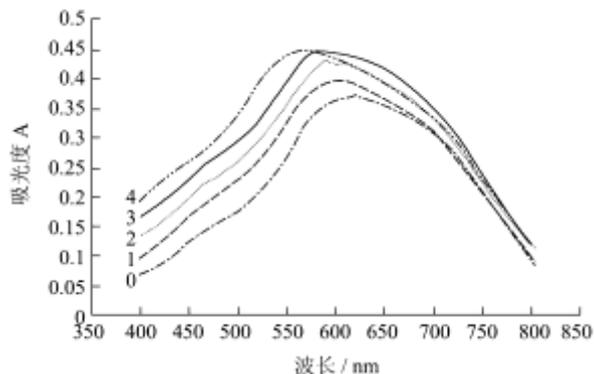


图 2 爆破压力对籼米淀粉紫外吸收光谱的影响

Fig.2 Effect of steam exploded pressure on ultraviolet absorption spectrum of indica rice starch

注: 0-籼米原淀粉, 1-爆破压力 0.5 MPa, 2-爆破压力 1.0 MPa, 3-爆破压力 1.5 MPa, 4-爆破压力 2.0 MPa。维压时间 30 s, 样品水分含量 12.57%。

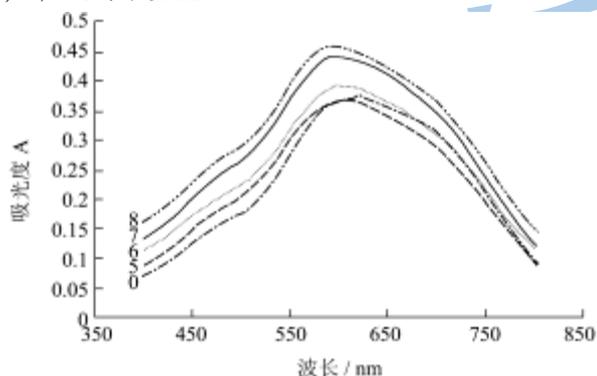


图 3 爆破时间对籼米淀粉紫外吸收光谱的影响

Fig.3 Effect of steam exploded retained time on ultraviolet absorption spectrum of indica rice starch

注: 0-籼米原淀粉, 5-维压时间 10 s, 6-维压时间 30 s, 7-维压时间 60 s, 8-维压时间 90 s。爆破压力 0.8 MPa, 样品水分含量 12.57%。

由图 2、图 3、图 4 可知, 籼米淀粉经蒸汽爆破处理后其紫外吸收光谱和原淀粉基本一致, 但最大吸收波长发生了变化。由图 2 可以看出, 随着汽爆压力的增加, 籼米淀粉最大紫外吸收波长减小, 由原淀粉的 616 nm~620 nm 减小到了 567 nm~570 nm (2.0 MPa)。由图 3 可以发现, 随着维压时间的延长, 籼米淀粉最大吸收波长由原淀粉的 616 nm~620 nm 下降到了 587

nm~591 nm (90 s)。由图 4 可知, 随着样品水分含量的增加, 其最大吸收波长发生较小程度的蓝移, 由 602 nm~611 nm (3.29%) 蓝移到了 590 nm~594 nm (22.15%)。这是由于在蒸汽爆破的作用下, 籼米淀粉中直链淀粉和支链淀粉分子发生降解, 淀粉链断裂, 淀粉分子聚合度减小的缘故。

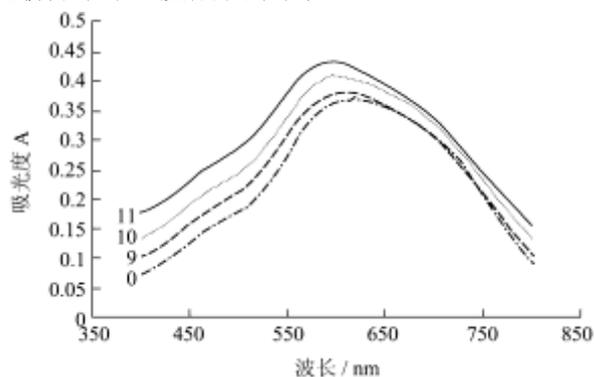


图 4 样品水分含量对籼米淀粉紫外吸收光谱的影响

Fig.4 Effect of sample moisture content on ultraviolet absorption spectrum of indica rice starch

注: 0-籼米原淀粉, 9-水分含量 3.29%, 10-水分含量 12.57%, 11-水分含量 22.15%。爆破压力 0.8 MPa, 维压时间 30 s。

## 2.4 蒸汽爆破处理对籼米淀粉红外吸收光谱的影响

淀粉的基本组成单元是  $\alpha$ -D-葡萄糖残基, 主要特征基团是 C2 和 C3 所连接的仲醇羟基以及  $\alpha$ -D-吡喃环结构。淀粉的红外吸收光谱可以划分成 4 个主要的区域: 800  $\text{cm}^{-1}$  以下 (葡萄糖吡喃糖环骨架模式振动区域), 800~1500  $\text{cm}^{-1}$  (指纹区), 2800~3000  $\text{cm}^{-1}$  (C-H 伸缩区域), 和 3000~3600 (O-H 伸缩区域) [10]。

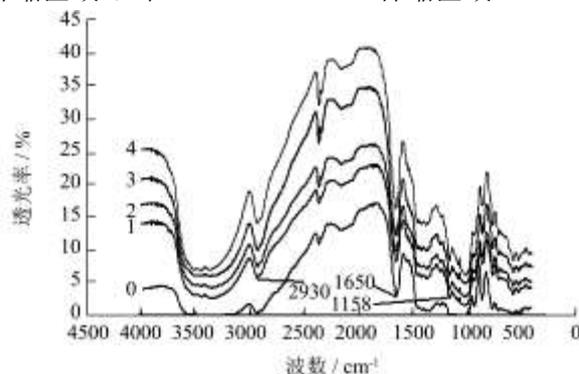


图 5 爆破压力对籼米淀粉红外吸收光谱的影响

Fig.5 Effect of steam exploded pressure on FTIR spectrum of indica rice starch

注: 0-籼米原淀粉, 1-爆破压力 0.5 MPa, 2-爆破压力 1.0 MPa, 3-爆破压力 1.5 MPa, 4-爆破压力 2.0 MPa。维压时间 30 s, 样品水分含量 12.57%。

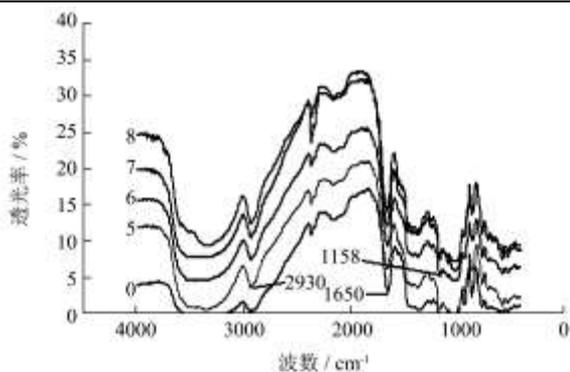


图6 爆破时间对籼米淀粉红外吸收光谱的影响

Fig.6 Effect of steam exploded retained time on FTIR spectrum of indica rice starch

注：0-籼米原淀粉，5-维压时间 10s，6-维压时间 30s，7-维压时间 60s，8-维压时间 90s。爆破压力 0.8 MPa，样品水分含量 12.57%。

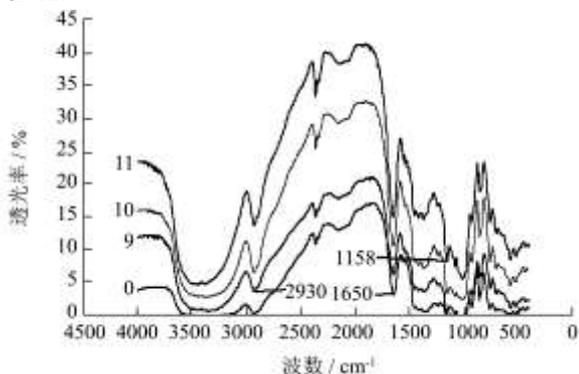


图7 样品水分含量对籼米淀粉红外吸收光谱的影响

Fig.7 Effect of sample moisture content on FTIR spectrum of indica rice starch

注：0-籼米原淀粉，9-水分含量 3.29%，10-水分含量 12.57%，11-水分含量 22.15%。爆破压力 0.8 MPa，维压时间 30s。

从图5、图6、图7可以看出，与原淀粉的红外光谱相比，蒸汽爆破处理后的籼米淀粉并无新的吸收峰产生，也就是说籼米淀粉分子骨架上没有产生新的官能团，表明蒸汽爆破处理没有改变籼米淀粉的化学结构。1650 cm<sup>-1</sup>附近为醛基的吸收峰，随着汽爆压力、维压时间、样品水分含量的增加，籼米淀粉汽爆作用增强，淀粉的分子链断裂产生的醛基增多，因而该区域吸收峰的强度增大。

在淀粉的红外吸收光谱中，1158 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰代表 C-O-C 的不对称伸缩振动，2930<sup>1</sup>处的吸收峰代表 C-CH<sub>2</sub>-C 的不对称伸缩振动，两者强度的比值表示淀粉颗粒的结晶程度，用淀粉结晶指数 (ICI) 表示。

$$ICI = \frac{T_{\lambda 1158}}{T_{\lambda 2930}} \quad (1)$$

其中：ICI 为淀粉结晶指数，T<sub>λ1158</sub> 为淀粉样品红外图谱在

1158 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰峰强，T<sub>λ2930</sub> 为淀粉样品红外图谱在 2930 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰峰强。

籼米淀粉经蒸汽爆破处理后，其淀粉结晶指数的变化见表5、表6、表7。

表5 爆破压力对籼米淀粉结晶指数的影响

Table 5 Effect of steam exploded pressure on ICI of indica rice starch

爆破压力/MPa	T <sub>λ1158</sub>	T <sub>λ2930</sub>	ICI
原淀粉	0.0570	0.3480	0.1638
0.5	2.5450	5.6610	0.4496
1.0	3.9730	7.4530	0.5331
1.5	5.8220	9.9190	0.5869
2.0	8.4100	13.9720	0.6019

注：维压时间 30s，样品水分含量 12.57%。

表6 爆破时间对籼米淀粉结晶指数的影响

Table 6 Effect of steam exploded retained time on ICI of indica rice starch

爆破时间/S	T <sub>λ1158</sub>	T <sub>λ2930</sub>	ICI
原淀粉	0.0570	0.3480	0.1638
10	0.8450	3.6610	0.2308
30	3.8950	9.5370	0.4084
60	7.0310	12.6030	0.5579
90	7.9860	13.8830	0.5752

注：爆破压力 0.8 MPa，样品水分含量 12.57%。

表7 样品水分含量对籼米淀粉结晶指数的影响

Table 7 Effect of sample moisture content on ICI of indica rice starch

水分含量/%	T <sub>λ1158</sub>	T <sub>λ2930</sub>	ICI
原淀粉	0.0570	0.3480	0.1638
3.29	0.6450	2.6610	0.2424
12.57	3.0510	6.4900	0.4701
22.15	7.9810	14.7300	0.5418

注：爆破压力 0.8 MPa，维压时间 30s。

由表5可以看出，随着汽爆压力的增加，籼米淀粉结晶指数随之增加，由原淀粉的 0.1638 增加到了 0.6019 (2.0 MPa)。由表6可以发现，随着维压时间的延长，籼米淀粉结晶指数由原淀粉的 0.1638 上升到了 0.5752 (90 s)。由表7可知，随着样品水分含量的增加，其淀粉结晶指数由 0.2424 (3.29%) 增长到了 0.5418 (22.15%)。这说明在蒸汽爆破的作用下，籼米淀粉分子链发生断裂，产生的短链片段易形成淀粉分子结晶结构，使得淀粉结晶层的结构特征逐渐增强，而无定型片层的结构特征逐渐减弱。

### 3 讨论

目前关于大米淀粉预处理国内外主要采用微波、辐射、生物技术等方法,通过微波、脉冲电场等预处理技术,降低大米淀粉分子聚合度,改变淀粉分子构象以及物理化学特性<sup>[12-14]</sup>。蒸汽爆破技术是一种能在毫秒级(0.00875 s)完成蒸汽爆破过程的弹射式汽爆技术,具有从分子水平上打破大分子晶格的效果。由于汽爆技术具有处理时间短、能耗低、无污染等优点,近年来越来越多的研究将其应用于天然产物原料的预处理。将蒸汽爆破技术引入籼米淀粉预处理,使其淀粉分子发生降解,淀粉分子聚合度减小,目前在国内外还没有见到相关文献。蒸汽爆破预处理对籼米淀粉其他物化特性的影响还需进一步研究。

## 4 结论

4.1 籼米淀粉经蒸汽爆破处理后,随着爆破压力、爆破时间以及样品水分含量的增加,籼米淀粉分子量下降,短链片段所占比例增加。

4.2 籼米淀粉经蒸汽爆破处理后其紫外吸收光谱和原淀粉基本一致,但其最大吸收波长发生兰移现象,表明淀粉分子链聚合度降低。

4.3 籼米淀粉经蒸汽爆破处理后其红外吸收光谱和原淀粉相比没有新的吸收峰产生,随着爆破压力、爆破时间以及样品水分含量的增加,1650 cm<sup>-1</sup>处吸收峰强度增大,淀粉结晶指数增加。

## 参考文献

- [1] 吴殿星,舒小丽,吴伟. 稻米淀粉品质研究与利用[M]. 北京:中国农业出版社,2009  
Wu Dian-xing, SHU Xiao-li, WU Wei. Studies and utilization of rice starch quality [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2009
- [2] 徐兴凤,钟业俊,夏文,等. 不同采收期籼米外观与米饭食味品质的相关性分析[J]. 食品科学,2013,34(23):147-150  
XU Xing-feng, ZHONG Ye-jun, XIA Wen, et al. Correlational analysis between appearance and eating quality of indica rice harvested at different times [J]. Food Science, 2013, 34(23): 147-150
- [3] Xu S Sha, Zhang J Xiang, Li Bin, et al. Preparation and physical characteristics of resistant starch (type 4) in acetylated indica rice [J]. Food Chemistry, 2012, 134(1): 149-154
- [4] 罗海力. 蒸汽爆破棉秆纤维形态及特性研究[D]. 南京:南京林业大学,2011  
LUO Hai-li. Influence of steam explosion on morphology and physico-chemical characteristics of cotton stalk fiber [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011
- [5] Zhengdao Yu, Bailiang Zhang, Fuqiang Yu, et al. A real explosion: the requirement of steam explosion pretreatment [J]. Bioresource Technology, 2012, 121: 335-341
- [6] Mazieh Shafiei, Mayam M Kabir, Hamid Zilouei, et al. Techno-economical study of biogas production improved by steam explosion pretreatment [J]. Bioresource Technology, 2013, 148: 53-60
- [7] Guangping Han, James Deng, Shuyin Zhang, et al. Effect of steam explosion treatment on characteristics of wheat straw [J]. Industrial Crops and Products, 2010, 31(1): 28-33
- [8] Yuzhen Zhang, Lan Wang, Hongzhang Chen. Formation kinetics of potential fermentation inhibitors in a steam explosion process of corn straw [J]. Appl. Biochem. Biotechnol., 2013, 169(2): 359-367
- [9] 龚凌霄. 青稞全谷物及其防治代谢综合征的作用研究[D]. 杭州:浙江大学,2013  
GONG Ling-xiao. Studies on whole grain of tibetan hull-less barley and its effect on metabolic syndrome [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013
- [10] Xiaoyan Song, Guoqing He, Hui Ruan, et al. Preparation and properties of octenyl succinic anhydride modified early indica rice starch [J]. Starch-Stärke, 2006, 58(2): 109-117
- [11] 吴跃,陈正行,林亲录等. FT-IR光谱法测定籼米淀粉回生[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2011,32(5):545-550  
WU Yue, CHEN Zheng-xing, LIN Qin-lu, et al. Retrogradation of long-shaped rice starch by FT-IR spectra [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2011, 32(5): 545-550
- [12] Daming Fan, Wenrui Ma, Liyun Wang, et al. Determining the effects of microwave heating on the ordered structures of rice starch by NMR [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92(2): 1395-1401
- [13] 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  
FAN Da-ming. Thermal effect of microwave on structure of rice starch [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012
- [14] 张本山,李芬芬,陈福泉. 脉冲电场对西米淀粉物化性质的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2011,39(9):17-21  
ZHANG Ben-shan, LI Fen-fen, CHEN Fu-quan. Influence of pulsed electric fields on physicochemical properties of sago starch [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(9): 17-21