

脉冲电场对木薯醋酸酯淀粉制备及其性质的影响

曾新安¹, 陈茹娇¹, 潘永康², 韩忠¹

(1. 华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640) (2. 广州市邮政信息技术局, 广东广州 510260)

摘要:以木薯淀粉为原料,以乙酸酐为酯化剂,在不同脉冲电场强度(0 kV/cm、2kV/cm、3 kV/cm、4 kV/cm、5 kV/cm、6 kV/cm、7 kV/cm)、不同有效处理时间(0 ms、3 ms、6 ms、9 ms、12 ms、15 ms)和不同乙酸酐添加量(4%、6%、8%、10%、12%)下湿法制备醋酸酯淀粉,对乙酰基及取代度进行测定,得出经过脉冲电场处理,木薯醋酸酯淀粉乙酰基含量和取代度都有所提高。乙酸酐添加量为6%,电场强度为4 kV/cm,有效处理时间为9 ms,样品取代度由0.084提高至0.110,说明脉冲电场处理可以促进酯化反应的进行,提高了酯化反应效率。此外还研究了木薯醋酸酯淀粉糊透明度、溶解度及膨润力、冻融稳定性和淀粉糊黏度性质,并通过红外光谱对产品进行结构表征。结果表明:经过脉冲电场处理,木薯淀粉颗粒均引入了乙酰基团,并提高醋酸酯淀粉的糊透明度、溶解度和膨润力,提高淀粉糊峰值黏度,而淀粉糊稳定性基本保持不变。

关键词:木薯淀粉;酯化;脉冲电场

文章编号:1673-9078(2015)7-197-204

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.7.031

Effect of Pulsed Electric Field on the Preparation and Properties of Cassava Starch Acetate

ZENG Xin-an¹, CHEN Ru-jiao¹, PAN Yong-kang², HAN Zhong¹

(1. College of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2. Guangzhou Postal Information Technology Bureau, Guangzhou 510260, China)

Abstract: Starch acetate was prepared from cassava starch with acetic anhydride as the esterifying agent by the wet process assisted by pulsed electric field (PEF) treatment. The effect of PEF parameters on the formation of cassava starch acetate was evaluated using different strengths (0, 2, 3, 4, 5, 6, and 7 kV/cm), and treatment durations (0, 3, 6, 9, 12, and 15 ms). The effect of the concentration of acetic anhydride added (4%, 6%, 8%, 10%, and 12%) was also explored. In addition, the properties of cassava starch acetate such as paste transparency, solubility, swelling power, freeze-thaw stability, and viscosity were evaluated. Acetyl content and degree of substitution measurements showed that both were increased after PEF treatment. The degree of substitution increased from 0.084 to 0.110 under the following conditions: 6% added acetic anhydride, 4 kV/cm PEF, and 12 ms of reaction duration, indicating that PEF could facilitate esterification. Infrared spectroscopy was used for structural characterization of cassava starch acetate, which showed that the acetyl group was introduced into the cassava starch molecules and improved paste transparency, solubility, swelling power, and peak viscosity, with no effect on freeze-thaw stability.

Key words: cassava starch; esterification; pulsed electric fields

淀粉具有很多独特的性质,可作为配料广泛应用在食品行业。但是天然淀粉其他的性质,例如糊化温度高、淀粉糊温不稳定、易老化、成膜性差,限制了其在工业上的应用。现代食品的多样性要求淀粉能够适用于各种各样的加工工艺,如高剪切搅拌、配送、仓储、冷冻等。因此,改性淀粉成为研究热点,以期

收稿日期:2015-01-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31301559、21376094);中央高校科研业务项目(2013ZM0025);广东省科技计划项目(2010A080403005, 2013B020311008)

作者简介:曾新安(1972-),男,博士,教授,主要从事食品绿色加工研究

通讯作者:韩忠(1981-),男,博士,讲师,主要从事食品绿色加工研究

望通过改性改善天然淀粉的功能特性^[1~3]。对淀粉的改性按方法分主要包括物理改性、酶法改性和化学改性。其中醋酸酯淀粉是一种化学改性淀粉,又称乙酰化淀粉,是在碱性条件下淀粉乳与醋酸酐、醋酸乙烯酯、醋酸等酯化剂反应生成,具有凝沉性弱、透明度高、糊化温度低、成膜性能高、储存稳定的特性,可作为理想的冷冻食品增稠剂和稳定剂^[4~5]。

脉冲电场技术(Pulsed Electric Fields, PEF)是近年来国际上新兴的食品研究领域,是一种将液态食品作为电解质置于容器内,与容器绝缘的两个放电电极通过高压电流,产生电脉冲进行作用的加工方法。对食品质量属性来说,PEF技术远远优于传统食品加热

的处理方法,因为它在很大程度上减少了食品感官和物理特性的有害变化。现已广泛地应用于食品的杀菌和钝酶,最大限度地维持食品的保鲜度,是近十几年来最有前途的实现工业化应用的加工技术之一,并伴随着装置的设计制造,这方面的研究已逐渐扩大。有研究表明,脉冲电场处理可促进醇酸无水体系及醇酸含水体系的酯化反应效率^[6],并可促进美拉德反应初级阶段的进行;可改变氨基酸的极性和电负性,提高氨基酸螯合金属离子的效率^[7],可提高蛋白质的溶解性、乳化性及起泡性^[8~11];可破坏壳聚糖结晶区^[12]。本研究利用高压脉冲电场处理木薯醋酸酯淀粉,考察高压脉冲电场对木薯醋酸酯淀粉制备及其性质的影响。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

木薯淀粉,广西南宁银麦粉业公司。

1.2 主要仪器

脉冲电场处理系统,华南理工大学脉冲电场课题组自制;电子天平,广州竞赢化工科技有限公司;傅里叶红外光谱仪 SP2000,英国 Pye Unicam Ltd.; Brabender 黏度仪,德国布拉本达有限公司;磁力搅拌器,金坛市宏华仪器厂;菲恰尔 TDL-5A 离心机,上海菲恰尔分析仪器有限公司;SHZ-D (III) 循环水式真空泵,巩义市予华仪器有限责任公司。

1.3 实验方法

1.3.1 木薯醋酸酯淀粉的制备^[13]

称取 35.00 g (干基)木薯淀粉,置于 500 mL 烧杯中加蒸馏水到 100.00 g,水浴 30 °C,使用磁力搅拌器边搅拌边滴加一定量浓度的乙酸酐(4%、6%、8%、10%、12%),并用 3% (m/m) NaOH 调节 pH,使 pH 值为 8.0~8.5,该过程在 0.5 h 内完成。接着将淀粉乳泵入处理室进行脉冲电场处理(场强为 0 kV/cm、2 kV/cm、3 kV/cm、4 kV/cm、5 kV/cm、6 kV/cm、7 kV/cm,脉冲电场有效处理时间为 0 ms、3 ms、6 ms、9 ms、12 ms、15 ms),流速为 2 mL/s,并调节 pH 为 8.0~8.5。反应完成后加入 HCl 调节淀粉乳的 pH 至 6.5,蒸馏水洗涤 3 次,然后将产物置于真空干燥箱中 45 °C 干燥 12 h,最后粉碎样品待用。

1.3.2 取代度的测定^[14]

称取 1.00 g 木薯醋酸酯淀粉样品于 250 mL 锥形瓶中,加入 50 mL 75% 无水乙醇,于 50 °C 加盖震荡

30 min,然后加入 40 mL 0.5 mol/L NaOH 标准溶液,以 1% 酚酞为指示剂。最后用 0.5 mol/L HCl 标准溶液滴定至红色消失。记录 HCl 标准溶液消耗的体积 V_1 ;同时做原淀粉的空白试验,所用 HCl 标准溶液的体积为 V_2 。按下式计算乙酰基含量、取代度及反应效率,并记录数据。

$$\text{乙酰基含量 } \omega = [(V_2 - V_1) \times c \times 0.043] / m \times 100\%$$

$$\text{取代度 } DS = 162 \times \omega / [43 - (43 - 1) \times \omega]$$

式中: V_1 为滴定木薯酯化淀粉消耗 HCl 标准溶液的体积, mL; V_2 为滴定原淀粉消耗 HCl 标准溶液体积, mL; c 为 HCl 标准溶液浓度, mol/L; m 为样品质量, g; 0.043 为与 1 mL 1.000 mol/L HCl 标准溶液相当的乙酰基质量, g; 43 和 1 为分别为乙酰基与氢原子的相对分子质量。

1.3.3 醋酸酯化淀粉红外结构表征

采用 KBr 压片法,分别将淀粉样品经 80% 乙醇溶液洗涤至有机酸完全洗净,烘干。将大约 2 mg 样品加入到 300 mg 左右经过研磨并干燥的 KBr 粉末中,在红外灯照射下置于玛瑙研钵中研磨 2~3 min,使充分混合。将研磨好混合物粉末压片后置于红外光谱仪进行全波段扫描,打印出红外光谱图。

1.3.4 醋酸酯化木薯淀粉的糊透明度测定

分别取原淀粉、木薯醋酸酯淀粉 1.0 g (干基),加蒸馏水 99.0 g,配制 1% (m/m) 淀粉乳,沸水浴中加热搅拌糊化 20 min,并定容至原体积,冷却至 25 °C,620 nm 下测定淀粉糊的透光率,1 cm 比色皿,以蒸馏水为空白,透光率(T)为 100%。

1.3.5 冻融稳定性测定

分别取原淀粉、木薯醋酸酯淀粉 6.0 g (干基),加蒸馏水 97.0 g 调成 6% (m/m) 淀粉乳,沸水浴 20 min 充分糊化,冷却,密封,置于 -18 °C 冷冻 24 h,然后取出于室温下自然解冻 6 h,置于 200 mL 离心管中以 3500 r/min 离心 20 min,弃去上清液,称取沉淀质量,计算析水率:

$$\text{析水率} = (\text{糊质量} - \text{沉淀质量}) / \text{糊质量} \times 100\%$$

1.3.6 溶解度及膨润力测定

准确称取 1.00 g (干基)淀粉,精确至 0.001 g,加入 49.0 g 蒸馏水,配成质量分数为 2% (m/m) 的淀粉乳,95 °C 条件下搅拌 30 min,3500 r/min 离心 20 min,移出上清液,105 °C 下烘干称重,即为水溶性淀粉的质量 (B),沉淀部分即为膨胀淀粉 (C),通过下列公式可计算淀粉糊溶解度 S 和膨润力 P。

$$\text{溶解度 } S(\%) = B/m \times 100$$

$$\text{膨润度 } P(\text{g/g}) = C/(m(1-S))$$

式中: B-被溶解的淀粉质量, g; C-沉淀物质量, g; m-淀粉干基质量, g。

1.3.7 Brabender 黏度曲线测定

准确称取 6.0g (干基) 的样品于 Brabender 黏度仪的回转杯中, 加入 94.0 g 蒸馏水, 配成质量分数为 6% (m/m) 的淀粉乳, 设置扭矩为 350 cmg, 回转杯的转速为 250 r/min。淀粉乳从 30 °C 开始升温, 以 7.5 °C 速度升温至 95 °C 后保温 5 min, 然后以 7.5 °C 的速度降温至 50 °C 并保温 5 min, 在整个过程中连续记录淀粉糊黏度的变化, 得到 Brabender 黏度曲线。

1.3.8 数据分析

各组实验数据均重复 3 次, 实验结果用 Excel 数据处理软件分析。

2 结果与讨论

2.1 乙酰基含量及取代度测定

2.1.1 不同电场强度取代度的变化

图 1 为不同电场强度下木薯醋酸酯淀粉取代度的变化。由图 1 可知, 乙酸酐浓度为 6%, 脉冲电场有效处理时间为 12 ms, 随着电场强度由 0 kV/cm 增加到 7 kV/cm, 样品乙酰基取代度先增大后减小, 在 4 kV/cm 处达到最大值 0.095。据文献报道, PEF 处理可促进醇酸常温酯化反应和乳酸乙醇酯化反应, 反应速率随着电场强度的增大而增大, 场强越大, 反应活化能降低得越多^[6-16]。由此可知, 在一定脉冲电场强度下, 木薯醋酸酯淀粉取代度有所增加, 可能是因为 PEF 处理降低酯化反应活化能, 提高了酯化反应效率。本实验中, 继续增大电场强度, 醋酸酯淀粉取代度却变小了, 可能是因为制备低取代度酯化淀粉时, 酯化反应是一个平衡反应, 反应体系中存在副反应, 较高的电场强度对分解反应的促进作用大于对合成反应的促进作用, 导致取代度与乙酰基含量达到最大值后下降, 相关文献也有类似报道^[17-19]。

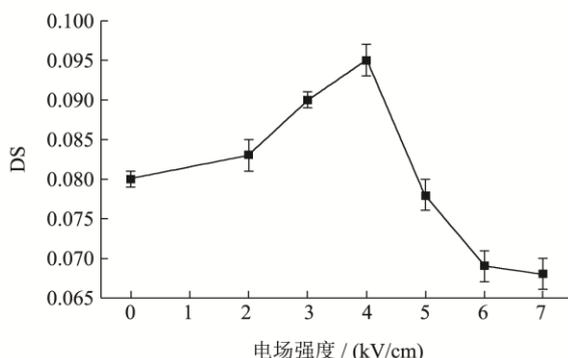


图 1 不同电场强度下木薯醋酸酯取代度 (乙酸酐浓度为 6%, 脉冲电场有效处理时间为 12ms)

Fig.1 The degree of substitution of cassava starch acetate under different electric field strengths

2.1.2 不同有效处理时间取代度的变化

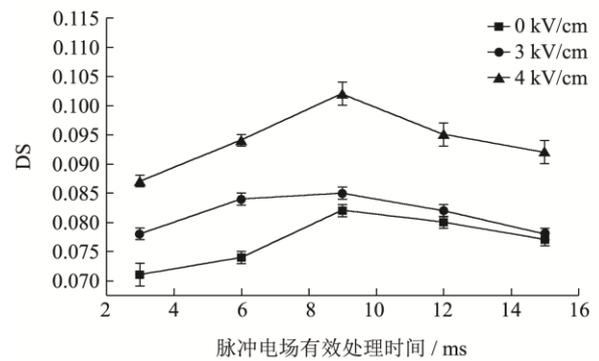


图 2 不同有效处理时间木薯醋酸酯的取代度 (乙酸酐浓度为 6%)

Fig.2 The degree of substitution of cassava starch acetate for different effective treatment durations

根据不同电场强度下取代度的大小, 选取处理效果最大的 2 个场强, 乙酸酐浓度为 6%, 探讨有效处理时间对取代度变化的影响。由图 2 可知, 随着有效处理时间由 0 ms 增加到 15 ms, 样品乙酰基取代度先增大后减小, 所有场强均在 9 ms 处达到最大值。有研究表明, 醋酸淀粉取代度随着处理时间延长, 取代度先增大后减小。当反应时间超过 1 h, 取代度下降, 这是因为随着作用时间延长, 酯化淀粉的分解反应速率大于合成反应速率^[15]。因此, 延长一定有效处理时间对增加酯化淀粉取代度具有一定的效果。

2.1.3 不同酸酐添加量取代度的变化

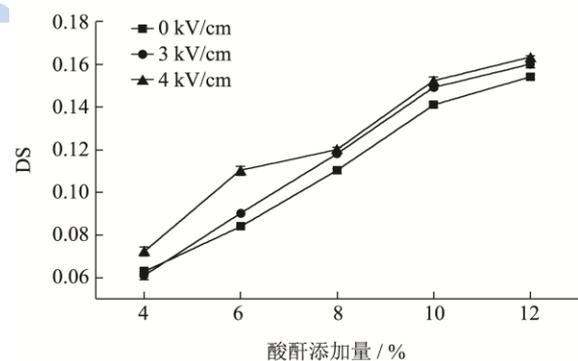


图 3 不同酸酐添加量木薯醋酸酯的取代度

Fig.3 The degree of substitution of cassava starch acetate with different concentrations of added acetic anhydride

根据不同电场强度下取代度的大小, 选取处理效果最大的 2 个场强, 脉冲电场有效处理时间为 9 ms, 探讨不同酸酐添加量对取代度变化的影响。由图 3 可知, 随着酸酐添加量的增加, 反应体系的电导率增大, 取代度也在增大。据文献报道, 即使在高电导率体系中, 脉冲电场仍能促进乳酸乙醇酯化反应的进行^[16]。较低场强对酯化反应的促进作用随着酸酐添加量的增大而增大。较高脉冲电场强度对酯化反应的促进作用

较大, 特别地对低浓度酸酐含量的促进作用明显。当酸酐添加量为 6%, 电场强度分别为 0 kV/cm、4 kV/cm, 电场有效处理时间为 9 ms, 取代度由 0.084 增大到 0.110。对这两组实验结果进行独立样本 T 检验, 结果表明两个样本的方差是齐性的($\text{sig}=0.422>0.05$), 即实验结果平均数的差异可以归因于实验处理不同造成的, 而 $\text{sig}(\text{双侧})=0.000<0.05$, 即实验结果的平均数存在显著性差异, 见表 1。韩斐报道在 30 °C, 酸酐添加量 6.25%, pH 8.2, 反应时间 150 min 制备玉米醋酸酯淀粉, DS 为 0.07^[17]。刘文娟报道在 25 °C, 酸酐添加量 7%, pH 8.5, 反应时间 60 min 制

备木薯醋酸酯淀粉, DS 为 0.081^[15]。也就是说, 利用脉冲电场协同处理制备醋酸酯淀粉, 可提高反应效率, 从而提高醋酸酯淀粉的取代度。

表 1 T 检验

Table 1 t-test

A 组统计量

组别	N	均值	标准差	均值的标准误
0kV/cm	3	0.084	0.001	0.000577
4kV/cm	3	0.110	0.002	0.001155

B 独立样本检验结果

方差方程的 Levene 检验		均值方程的 t 检验							
F	Sig.	t	df	Sig.(双侧)	均值差值	标准误差值	差分的 95%置信区间		
							下限	上限	
假设方差相等	0.8	0.422	-20.140	4	0.000	-0.026	0.001291	-0.02958	-0.02242
假设方差不相等			-20.140	2.941	0.000	-0.026	0.001291	-0.03016	-0.02185

2.2 木薯醋酸酯淀粉的红外光谱分析 (FT-IR)

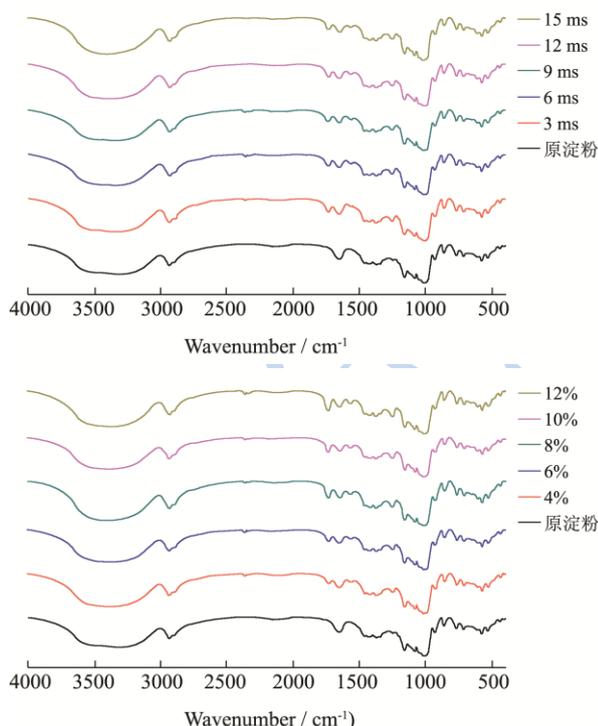


图 4 木薯淀粉及不同处理条件下淀粉的红外衍射图 (脉冲电场强度 4 kV/cm)

Fig4 The infrared diffraction patterns of cassava starch and starch acetate under different treatments (4 kV/cm PEF)

由图 4 可看出, 745 cm^{-1} 、860 cm^{-1} 、925 cm^{-1} 处为淀粉的特征吸收峰, 与原淀粉相比, 醋酸淀粉增加了 3 个吸收峰, 分别为 1730 cm^{-1} 、1374 cm^{-1} 、1250 cm^{-1}

处有淀粉的特征吸收峰外, 1730 cm^{-1} 处的吸收峰是 C=O 的伸缩振动峰, 1371 cm^{-1} 和 1250 cm^{-1} 处是醋酸酯的特征吸收峰, 说明在实验条件下木薯淀粉与醋酸酐发生了化学反应, 已经引入了乙酰基。

木薯淀粉乳和乙酸酐的反应体系在脉冲电场协同处理下, 淀粉颗粒也引入了乙酰基团。与没有经过脉冲电场处理制得的木薯醋酸酯淀粉结构相比, 并没有引入其他新的基团, 因而没有改变木薯醋酸酯淀粉的基本结构组成。

2.3 木薯醋酸酯淀粉的糊透明度

淀粉糊的透明度是食品加工上重要品质因素, 常用透光率反映淀粉糊透明度的大小, 透明度越高, 与水结合的能力越强。木薯醋酸酯淀粉透明度 T 如图 5 所示。经过脉冲电场处理, 醋酸酯淀粉糊的透明度均增大。

在相同有效处理时间下, 电场强度越大, 样品的透明度越高。而在相同电场强度下, 随着有效处理时间增大, 透明度增加的速度变小。随着酸酐添加量的增加, 透明度随着处理场强的增大而增大。淀粉糊透明度的大小与醋酸酯淀粉取代度的大小存在一定关系。据文献报道, 醋酸酯淀粉取代度越大, 淀粉糊透明度越高^[15,17]。在一定条件下, 取代度随着电场强度和酸酐添加量的增大而增大, 因此淀粉糊的透明度增大。有研究表明, 玉米淀粉经高压脉冲电场处理后, 淀粉颗粒表面出现不同程度裂痕而变得粗糙, 淀粉颗粒的表层被破坏, 与水作用加快^[20-23]。酯化反应首先作用于

淀粉颗粒的非结晶区，脉冲电场作用可能破坏了原淀粉的分子结构，淀粉颗粒表面有一定的破坏，因此更容易酯化。乙酰基含量增大，淀粉分子内部由于同性电荷的基团排斥力而发生膨胀，阻碍了淀粉分子间的缔和，使淀粉颗粒膨胀，分子间距离增大，减弱了光的反射强度，提高了淀粉糊的透明度。

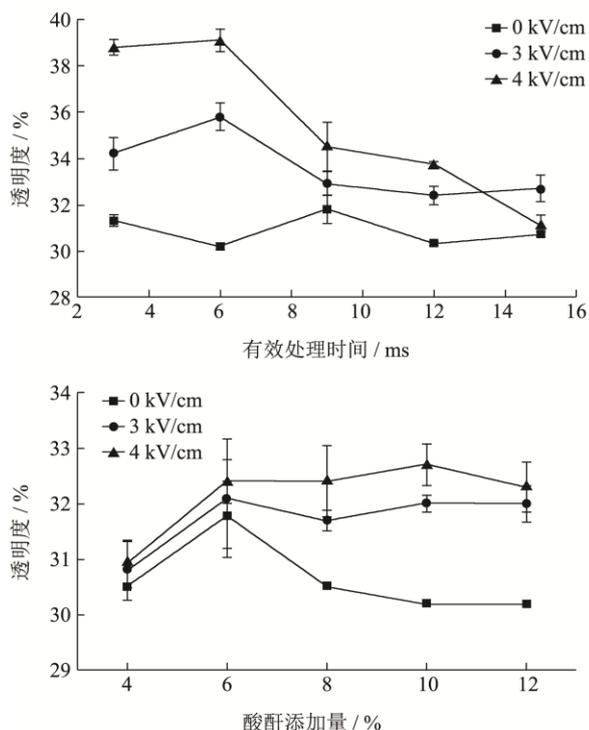


图5 不同处理条件下醋酸酯化木薯淀粉的透明度

Fig.5 The transparency of cassava starch acetate in different treatments

2.4 木薯醋酸酯淀粉的冻融稳定性

冻融稳定性反映淀粉分子的持水能力，和淀粉的分子结构有很大的关系。淀粉的冻融稳定性用析水率表示，析水率越大表示冻融稳定性越差。图6为不同处理条件下木薯醋酸酯淀粉的析水率。析水率随着电场强度及酸酐添加量的增加而减少，同理，冻融稳定性随取代度增加而增加。当有效处理时间小于12 ms时，析水率随着有效处理时间的延长而下降，处理时间为12 ms时，淀粉糊析水率大幅度下降，冻融稳定性增加。而当有效处理时间为15 ms时，淀粉糊析水率发生明显上升，冻融稳定性下降。

淀粉糊析水率下降是由于淀粉醋酸酯引入了亲水的乙酰基团，可以更好地与水分子水合，维持良好的淀粉糊状态，淀粉糊体系不易分散。另一方面乙酰基团的引入与支链淀粉的脱水葡萄糖羟基形成分子内氢键，阻碍了支链淀粉分子间氢键生成，分子间空间阻碍增大，使分子之间不易重新排列和缔合，冻融稳

定性得到改善^[17]。

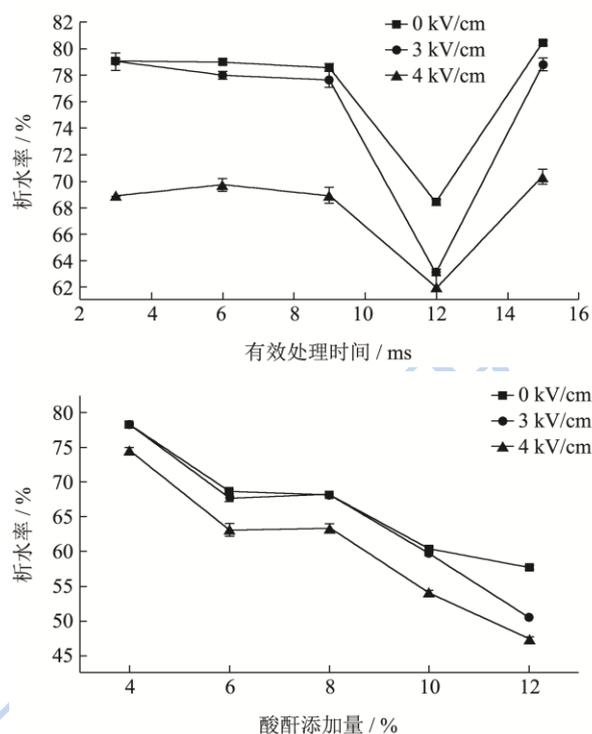


图6 不同处理条件下木薯醋酸酯淀粉的析水率

Fig.6 The syneresis rate of cassava starch acetate in different treatments

2.5 木薯醋酸酯淀粉的溶解度及膨润力

淀粉的溶解特性和膨胀特性是十分重要的理化性质，溶解度与膨胀度反映了淀粉与水之间相互作用的大小。溶解度指在一定温度下，淀粉样品分子的溶解质量百分数；膨润力指每克干淀粉在一定温度下吸水的质量数。

经过脉冲电场协同处理，木薯醋酸酯淀粉取代度增加，表明乙酰基团含量升高。由图7可以看出，经过PEF 4 kV/cm且有效处理时间为3 ms制得的木薯醋酸酯淀粉在95℃加热条件下具有较高的溶解度。PEF处理后，酯化淀粉的溶解度均比无脉冲电场处理的有所升高，随有效处理场强的增大的增大，但是随着时间的增加而减小。由图8可知，经过脉冲电场处理后，木薯酯化淀粉的取代度增大，其膨胀度比未经脉冲电场处理的高。淀粉颗粒引入乙酰基团可以使淀粉分子内氢键作用被破坏，从而促进水分子的渗入^[24]，提高了醋酸酯淀粉的亲水性，也就提高了样品的溶解度与膨润力^[25]。有研究表明，经过PEF处理，随着处理时间的增加，玉米淀粉的膨胀度有所下降，且电场强度对淀粉膨胀度和溶解度的影响要强于有效处理时间对其的影响。淀粉膨胀度与其分子间的作用力有关，膨胀度越低，分子间作用力越强^[26-27]。在脉冲电场环境

下, 较高的电场强度促进乙酰基团与羟基的反应, 强化了酯化反应, 引入更多的乙酰基团, 提高了淀粉和水的结合, 弱化了淀粉分子内分子间作用力, 因此醋酸酯淀粉的膨润力升高。

起始温度降低, 峰值黏度升高。淀粉糊黏度增加是由淀粉分子膨胀引起的, 糊化温度降低, 说明淀粉分子越容易膨胀。乙酰化后淀粉分子上引入了亲水性乙酰基团, 使得淀粉分子间的氢键作用力减弱, 淀粉更容易吸水膨胀。而木薯醋酸酯淀粉经 PEF 处理后, 乙酰基含量增大, 峰值黏度比未经 PEF 处理的有所升高, 冷热淀粉糊的稳定性基本保持不变。

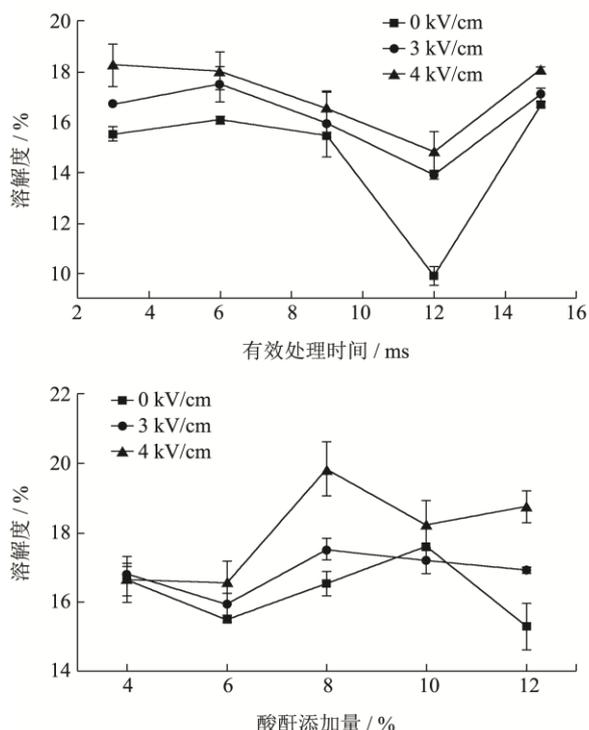


图 7 不同处理条件下木薯醋酸酯淀粉的溶解度

Fig.7 Solubility of cassava starch acetate in different treatments

2.6 木薯醋酸酯淀粉糊黏度及糊化性质

木薯原淀粉、醋酸酯淀粉的 Brabender 黏度曲线如表 2 所示。由表 2 可知, 木薯原淀粉酯化后, 糊化

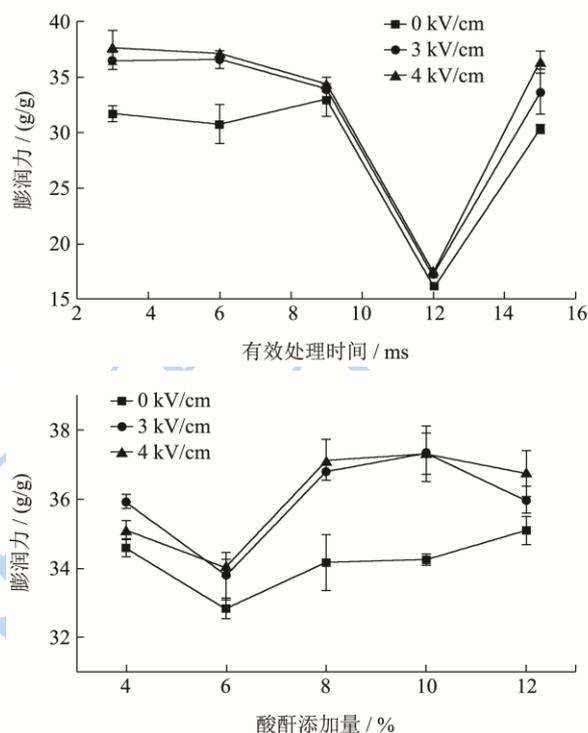


图 8 不同处理条件下木薯醋酸酯淀粉的膨润力

Fig.8 Swelling power of cassava starch acetate in different treatments

表 2 木薯原淀粉及醋酸淀粉糊性质

Table 2 Pasting properties of native and acetylated cassava starch

样品	糊化温度/°C	峰值黏度/BU	崩解值/BU	热糊稳定性/BU	凝沉值/BU	冷糊稳定性/BU	
原淀粉	68.1±0.3	253±5.0	132±1.4	41±1.0	124±4.0	2±0.1	
0 kV/cm	64.6±0.4	260±4.6	142±4.0	29±2.5	102±2.7	17±0.5	
2 kV/cm	64.7±0.6	276±3.7	153±2.3	31±2.1	111±3.3	21±1.0	
3 kV/cm	64.6±0.4	269±4.4	150±3.5	30±2.6	104±2.4	16±0.7	
4 kV/cm	64.5±0.4	262±2.1	145±1.6	33±1.4	102±3.6	15±0.8	
5 kV/cm	64.3±0.5	273±2.7	148±3.7	32±3.2	105±5.0	21±1.0	
6 kV/cm	64.7±0.3	263±3.2	142±2.5	31±1.5	107±3.4	18±0.9	
<hr/>							
0 kV/cm	3 ms	62.1±0.2	272±1.2	149±2.0	36±2.8	104±2.4	21±1.6
	6 ms	64.2±0.2	262±3.6	144±1.8	29±1.1	102±1.5	22±1.2
	9 ms	64.3±0.4	260±2.9	145±1.0	31±1.7	100±2.8	17±1.1
	12 ms	64.6±0.3	260±3.0	142±2.4	29±2.1	102±3.5	17±1.4
	15 ms	64.5±0.4	264±5.4	144±1.5	29±3.0	103±2.6	19±1.1
<hr/>							
3 ms	63.4±0.1	277±6.3	153±2.7	32±1.8	112±3.8	22±0.7	

转下页

接上页							
3 kV/cm	6 ms	63.8±0.4	274±4.5	148±3.1	33±2.7	110±2.0	24±2.5
	9 ms	63.3±0.2	269±1.9	148±2.6	33±0.8	104±2.2	20±0.9
	12 ms	64.6±0.3	269±2.4	150±1.0	30±2.1	104±1.4	16±1.2
	15 ms	64.1±0.3	267±3.5	144±1.4	31±1.9	107±2.9	25±1.9
4 kV/cm	3 ms	64.5±0.5	269±5.1	148±2.7	29±1.0	105±2.2	17±3.0
	6 ms	64.2±0.2	267±4.6	145±1.3	34±2.1	108±3.3	19±2.1
	9 ms	64.4±0.2	262±3.9	143±1.3	29±1.7	108±3.0	22±1.7
	12 ms	64.5±0.0	262±5.2	145±2.8	33±4.0	102±2.8	15±4.0
	15 ms	63.4±0.3	265±5.6	145±1.1	34±0.9	100±4.2	14±5.2
0 kV/cm	4%	65.2±0.1	254±1.5	137±2.6	33±1.3	107±3.5	17±1.2
	6%	64.3±0.4	260±2.9	145±1.9	31±2.4	100±2.6	17±2.5
	8%	63.6±0.2	267±3.0	148±2.3	27±1.9	94±3.0	16±2.0
	10%	62.1±0.4	272±0.8	151±1.7	27±0.5	96±1.8	17±3.3
	12%	61.1±0.2	284±1.9	159±2.5	26±1.2	99±1.0	22±1.5
	4%	65.1±0.3	273±2.6	152±0.9	34±1.7	121±1.3	24±2.6
3 kV/cm	6%	63.3±0.2	269±2.2	148±3.6	33±2.6	104±2.8	20±2.3
	8%	63.1±0.4	294±3.4	169±1.4	32±1.8	104±1.5	26±2.4
	10%	61.7±0.3	295±2.8	168±2.6	30±2.3	106±2.4	21±2.1
	12%	60±0.1	284±0.9	154±0.7	33±0.5	105±0.7	27±0.7
	4%	65.5±0.1	252±1.7	135±0.5	33±1.5	105±0.6	18±1.2
4kV/cm	6%	64.4±0.4	262±1.5	143±2.4	29±2.1	108±1.9	22±1.4
	8%	63.7±0.2	266±2.6	148±3.2	32±2.9	99±1.4	17±1.8
	10%	62.7±0.1	268±1.7	151±1.9	27±1.3	94±1.0	20±1.5
	12%	64.7±0.2	246±3.5	162±2.2	26±3.0	93±2.1	17±3.1

3 结论

通过不同脉冲电场条件处理木薯淀粉得到木薯醋酸酯淀粉,并对取代度及其它性质进行测定。结果随着电场强度的增加,取代度也在增加。脉冲电场处理的样品,通过红外表征 1735 cm^{-1} 处的吸收峰是 C=O 的伸缩振动峰, 1370 cm^{-1} 和 1250 cm^{-1} 处是醋酸酯的特征吸收峰,说明木薯淀粉与乙酸酐发生了化学反应,引入了乙酰基。其次增加有效处理时间及酸酐添加量,醋酸淀粉乙酰基取代度增大,说明了脉冲电场处理可以促进木薯醋酸酯淀粉发生反应。经脉冲电场处理后的酯化淀粉糊透明度、溶解度和膨润力均增强,冻融稳定性得到改善,淀粉糊峰值黏度升高,冷热淀粉糊稳定性基本保持不变。

参考文献

[1] Das A B, Singh G, Singh S, et al. Effect of acetylation and dual modification on physico-chemical, rheological and morphological characteristics of sweet potato (*Ipomoea batatas*) starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 12(18):

725-732

- [2] Perez-Gallardo A, Bello-Perez L A, Garcia-Almendarez B, et al. Effect of structural characteristics of modified waxy corn starches on rheological properties, film-forming solutions, and on water vapor permeability, solubility, and opacity of films [J]. Starch-Starke, 2011, 4(2):27-36
- [3] Diop C I K, Li H L, Xie B J, et al. Effects of acetic acid/acetic anhydride ratios on the properties of corn starch acetates [J]. Food Chemistry, 2010, 12(5):1662-1669
- [4] Bello-Perez L A, Agama-Acevedo E, Zamudio-Flores P B, et al. Effect of low and high acetylation degree in the morphological, physicochemical and structural characteristics of barley starch [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2010, 4(3):1434-1440
- [5] Sanchez-Rivera M M, Flores-Ramirez I, Zamudio-Flores P B, et al. Acetylation of banana (*Musa paradisiaca* L.) and maize (*Zea mays* L.) starches using a microwave heating procedure and iodine as catalyst: Partial characterization [J]. Starch-Starke, 2009, 2(9):155-164
- [6] Lin Z R, Zeng X A, Yu S J, et al. Enhancement of

- Ethanol-Acetic Acid Esterification Under Room Temperature and Non-catalytic Condition via Pulsed Electric Field Application [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(7): 2637-2645
- [7] 于倩,曾新安. 高强脉冲电场强化甘氨酸铜螯合反应[J]. *食品与发酵工业*, 2013, 39(10): 69-72
YU Qian, ZENG Xin-an. Effect of PEF treatments on enhancing the chelation reaction between glycine and copper sulfate [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2013, 39(10): 69-72
- [8] Liu Y Y, Zeng X A, Chen X D. Effects of pulsed electric fields and heat treatments on SPI structure analyzed by FT-IR [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(9): 2340-2344
- [9] Liu Y Y, Zeng X A, Han Z. Raman spectra study of soy protein isolate structure treated with pulsed electric fields [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(12): 3236-3239
- [10] Liu Y Y, Zeng X A, Deng Z, et al. Effect of pulsed electric field on the secondary structure and thermal properties of soy protein isolate [J]. *European Food Research and Technology*, 2011, 841-850
- [11] Liu Y Y, Zhang Y, Zeng X A, et al. Effect of pulsed electric field on microstructure of some amino acid group of soy protein isolates [J]. *International Journal of Food Engineering*, 2014, 10: 113-120
- [12] 唐超. 脉冲电场臭氧协同处理装置设计及降解壳聚糖应用研究[D]. 广州: 华南理工大学硕士学位论文, 2011
TANG Chao. Design and Application Study of Combined Pulsed Electric Field and Ozone Device for Chitosan Degradation [D]. Guangzhou: Dissertation for Degree of Master, South China University of Technology, 2011
- [13] Saarat S, Puttanlek C, Rungsardthong V, et al. Paste and gel properties of low-substituted acetylated canna starches [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2005, 5(24): 211-221
- [14] Singh N, Chawla D, Singh J. Influence of acetic anhydride on physicochemical, morphological and thermal properties of corn and potato starch [J]. *Food Chemistry*, 2003, 10(8): 601-608
- [15] 刘文娟, 梁琪, 方东平, 等. 木薯醋酸酯淀粉的制备及性能研究[J]. *中国食品添加剂*, 2012, 6: 142-146
LIU Wen-juan, LIANG Qi, FANG Dong-ping, et al. Study on preparation and properties of tapioca starch acetate [J]. *China Food Additives*, 2012, 6: 142-146
- [16] 刘新雨. 脉冲电场对乳酸乙醇酯化反应的影响[D]. 广州: 华南理工大学硕士学位论文, 2012
LIU Xin-yu. Effect of Pulsed Electric Field on Esterification of Lactic Acid and Ethanol [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012
- [17] 韩斐. 醋酸酯玉米淀粉的制备、表征及性能研究[D]. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2013
HAN Fei. Study on the Synthesis, Characterization and Properties of Acetylated Corn Starch [J]. Lan Zhou: Lanzhou University, 2013
- [18] De Graef R A, Broekroelofs G A, Janssen L P B M, et al. The kinetics of the acetylation of gelatinised potato starch [J]. *Carbohydrate Polymers*, 1995, 28: 137-144
- [19] Han F, Liu M Z, Gong H H., et al. Synthesis, characterization and functional properties of low substituted acetylated corn starch [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2012, 50: 1026-1034
- [20] Han Z, Zeng X A, Zhang B S, et al. Effects of pulsed electric fields (PEF) treatment on the properties of corn starch [J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 93: 318-323
- [21] Han Z, Zeng X A, Fu N, et al. Effects of pulsed electric field treatments on some properties of tapioca starch [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 89: 1012-1017
- [22] Han Z, Zeng X A, Yu S J, et al. Effects of pulsed electric fields (PEF) treatment on physicochemical properties of potato starch [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2009, 10: 481-485
- [23] Han Z, Yu Q, Zeng X A, et al. Studies on the Microstructure and Thermal Properties of Pulsed Electric Fields (PEF)-Treated Maize Starch [J]. *International Journal of Food Engineering*, 2012, 8: article 1
- [24] A M L Huijbrechts, M Desse, T Budtova, et al. Physicochemical properties of etherified maize starches [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2008, 74: 170-184
- [25] Han F, Liu M Z, Gong H H, et al. Synthesis, characterization and functional properties of low substituted acetylated corn starch [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2012, 50: 1026-1034
- [26] Guerra Dias A R, Zavareze E D R, Spier F, et al. Effects of annealing on the physicochemical properties and enzymatic susceptibility of rice starches with different amylose contents [J]. *Food Chemistry*, 2010, 5(40): 711-719
- [27] Gomes A M M, da Silva C E M, Ricardo N. Effects of annealing on the physicochemical properties of fermented cassava starch (polvilho azedo) [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2004, 11(16): 1-6

现代食品科技