

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90153

电场处理对普鲁兰酶水解糯米淀粉的影响

Effect of the electric field treatment on the pullulanase-catalyzed hydrolysis of waxy rice starch

陈彩雯¹ 田佳宁¹ 于坤正² 李丹丹¹CHEN Cai-wen¹ TIAN Jia-ning¹ YU Kun-zheng² LI Dan-dan¹

(1. 南京农业大学食品科技学院, 江苏 南京 210095; 2. 济宁赛宝工业信息技术研究院, 山东 济宁 272000)

(1. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China; 2. Jining Saibao Industrial Information Technology Research Institute, Jining, Shandong 272000, China)

摘要:目的: 探明电场处理对普鲁兰酶水解糯米淀粉的强化作用机理。方法: 测定不同强度电场作用下普鲁兰酶水解糯米淀粉的效率, 并利用扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、差示扫描量热仪和快速黏度分析表征酶解产物的结构和热性质变化。结果: 强度 ≤ 2.5 V/cm 的电场处理可提高普鲁兰酶活力、促进糯米淀粉的水解, 并且水解产物表面出现裂痕和孔洞、相对结晶度增加、起始糊化温度(T_0)增加、淀粉糊黏度降低; 强度 ≥ 5 V/cm 的电场处理可引起普鲁兰酶的部分失活、糯米淀粉水解效率降低、相对结晶度和淀粉糊黏度等降低。结论: 在当前试验条件下, 电场处理对普鲁兰酶水解糯米淀粉的强化作用主要影响普鲁兰酶活性, 而对糯米淀粉结构无显著影响。

关键词: 电场; 普鲁兰酶; 糯米淀粉; 水解

Abstract: **Objective:** This study aimed to classify the mechanism of pullulanase-catalyzed hydrolysis of waxy rice starch under electric field treatment, by monitoring the changes in hydrolysis efficiency, pullulanase activity, and the structure and properties of waxy rice starch. **Methods:** The hydrolysis efficiency was determined, and the structure and thermal properties of hydrolysates were characterized, by using scanning electron microscope, X-ray diffractometer, differential scanning calorimeter and rapid viscosity analyzer. **Results:** Under the control of the following conditions, electric field with intensities ≤ 2.5 V/cm could increase pullulanase activity, accelerate the hydrolysis, induce the pores and cracks on the granule surface, increase the relative crystallinity, increase the gelatinization temperature and reduce

the pasting viscosity of waxy rice starch. However, electric field with intensities ≥ 5 V/cm could cause the partial inactivation of pullulanase and reduce the hydrolysis efficiency, and consequently caused less change of the relative crystallinity and pasting viscosity. **Conclusion:** The strengthening effect of the electric field treatment on pullulanase hydrolysis of waxy rice starch mainly affected pullulanase activity, but has no significant effect on the structure of starch.

Keywords: electric field; pullulanase; waxy rice starch; hydrolysis

淀粉,除了作为人类和动物的食物之外,绝大部分通过酶法或化学法转化为淀粉水解物、葡萄糖浆、果糖糖浆和麦芽糊精等高附加值产品^[1-2]。工业上使用的淀粉原料多数是支链淀粉与直链淀粉的混合物,其中支链淀粉含量一般在 75%~85%。直链淀粉是由 α -1,4-糖苷键形成的线性聚合物,支链淀粉则由约 95% 的 α -1,4-糖苷键和约 5% 的 α -1,6-糖苷键形成的多分支结构构成^[3]。因此,为了彻底水解淀粉,通常需要多种淀粉酶的协同作用。其中,葡萄糖淀粉酶既能水解 α -1,4-糖苷键又能水解 α -1,6-糖苷键,但其水解 α -1,6-糖苷键的速率较慢,而造成淀粉质原料利用率及产品品质的下降。而普鲁兰酶能够专一性地切开支链淀粉中的 α -1,6-糖苷键,加速 α -1,6-糖苷键的水解,实现原料利用率的提高及产品品质的改善^[4-5]。因此,普鲁兰酶逐渐成为淀粉加工中不可或缺的关键酶制剂,被广泛应用在淀粉糖加工、改性淀粉、医药、饲料、啤酒及白酒酿造等工业中,尤其是作为淀粉加工中的非大宗关键酶制剂,在工业应用方面有重大价值及大量需求^[6-7]。

电场作为食品处理的常用物理方式,可以改善淀粉的理化性质和微观结构,作为淀粉常压干法改性的方法,具有重要的工业应用潜力^[8]。同时,其特有的电学特性

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(编号:32102131); 江苏省自然科学基金青年项目(编号:KB20190523); 中国博士后面上项目(编号:2020M681631)

作者简介: 陈彩雯,女,南京农业大学在读硕士研究生。

通信作者: 李丹丹(1994—),女,南京农业大学讲师,博士。

E-mail: lidandan@njau.edu.cn

收稿日期: 2021-11-23

在淀粉改性和酶活性调控方面表现出了高适应现象^[9]。Samaranayake 等^[10]发现,60℃条件下 1 V/cm 电场处理后, α -淀粉酶活性可增加 41%。Durham 等^[11]发现,30℃条件下,8~12 V/cm 电场处理后,纤维素的酶解速率常数可增加 49%~164%。Ohshima 等^[12]发现,与传统水浴加热相比,低强度脉冲电场在相同加热速率时,可提高酶活性 5%~20%。与菌株筛选、基因工程菌株构建等复杂方法相比,电场处理具有操作简单、容易实现的优点。然而现有研究中,未见关于电场处理对普鲁兰酶活力影响的报道,其作用机制不明。研究拟以糯米淀粉为原料,通过扫描电子显微镜、X-射线衍射仪、差示扫描量热仪和快速黏度仪等技术对电场作用下糯米淀粉酶解效率、酶解淀粉的颗粒形貌、结晶性质和热特性等进行研究,并在此基础上探究电场处理对普鲁兰酶活力(不加淀粉)以及淀粉结构性质(不加酶)的影响,从而解析电场影响普鲁兰酶水解糯米淀粉的机制,为电场技术在淀粉酶法改性领域的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

糯米淀粉:食品级,淀粉含量 95%以上,其中支链淀粉含量达 98%,安徽蚌埠市兄弟粮油食品有限公司;

普鲁兰酶:1 U/mg,上海源叶生物试剂有限公司;

DNS 试剂:分析纯,上海源叶生物试剂有限公司;

醋酸、醋酸钠、盐酸、氢氧化钠等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

单相输出 500VA 变频电源:KHD-1100 型,宁波凯华德电子科技有限公司;

紫外可见分光光度计:HP 33120A 型,南京菲勒仪器有限公司;

扫描电子显微镜:EVO-LS10 型,德国卡尔·蔡司股份有限公司;

X 射线衍射仪:D2 PHASER 型,美国 Bruker 仪器公司;

差氏扫描量热仪:Q20 型,美国 TA 仪器公司;

快速黏度分析仪:RVA 4500 型,澳大利亚 Perten 公司;

冷冻干燥机:FreeZone 型,美国 Lanconco 公司;

高速离心机:GL-20G-H 型,上海安亭科学仪器厂。

1.3 方法

1.3.1 电场处理对普鲁兰酶水解糯米淀粉的影响 利用乙酸钠缓冲液(0.04 mol/L,pH 4.4)配制 0.06 g/mL 的普鲁兰酶溶液,并取 20 mL 加入 2.0 g 糯米淀粉,磁力搅拌 30 s,50℃恒温水浴,插入电极片(电极尺寸 10 mm×10 mm×2 mm),打开交变电源(正弦)进行电场处理:电场强度分别为 0.0,2.5,5.0,7.5,10.0,12.5 V/cm;电场频率 50 Hz;处理时间 20 min。处理后,加入 2 mol/L

NaOH 溶液调整 pH 至 11.0 灭酶,再加入 2 mol/L HCl 溶液中和。3 500 r/min 离心 10 min,所得沉淀物经 80%乙醇洗涤 3 次(每次 100 mL),冻干备用;利用 DNS 法测定上清液中还原糖含量。

1.3.2 电场处理对普鲁兰酶活力的影响(不加淀粉) 利用乙酸钠缓冲液(0.04 mol/L,pH 4.4)配制 0.06 g/mL 的普鲁兰酶溶液,并取 20 mL,50℃恒温水浴,电场强度分别为 0.0,2.5,5.0,7.5,10.0,12.5 V/cm;电场频率 50 Hz;处理时间 20 min,测定酶活力。

1.3.3 电场处理对淀粉结构性质的影响(不加酶) 准确称取 2.0 g 糯米淀粉于 20 mL 乙酸钠缓冲液(0.04 mol/L,pH 4.4)中,混匀,50℃恒温水浴,电场强度分别为 0.0,2.5,5.0,7.5,10.0,12.5 V/cm;电场频率 50 Hz;处理时间 20 min,3 500 r/min 离心 10 min。所得沉淀物经 80%乙醇洗涤 3 次(每次 100 mL),冻干备用。

1.3.4 还原糖含量测定 采用 DNS 法^[13]。

1.3.5 酶活力测定 参照龙杰^[5]的方法。

1.3.6 扫描电镜观察(SEM) 用牙签将淀粉及其酶解产物均匀分散至双面导电胶带上(双面导电胶带固定于载物台上),用洗耳球吹去粘结不牢的粉末,真空喷金,观察淀粉及其酶解产物的表面形态(加速电压 5 000 V,放大倍数 5 000)。

1.3.7 X-射线衍射分析(XRD) 参照 Li 等^[14]的方法。Cu K α 辐射,管压 40 kV,管流 40 mA,扫描速度 4 (°)/min,扫描范围(2 θ)4°~40°,步长 0.028,接受狭缝 0.2 mm。利用 MDI Jade 6.5 软件分析谱图,分析结晶晶型并按式(1)计算相对结晶度。

$$R_c = \frac{A_c}{A_a + A_c} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R_c ——相对结晶度,%;

A_c ——结晶区含量,%;

A_a ——无定形区含量,%。

1.3.8 差示扫描量热分析(DSC) 参照 Li 等^[15]的方法。

1.3.9 快速黏度分析(RVA) 参照 AACC 76-21。

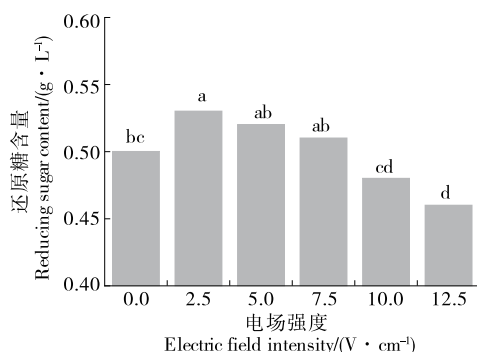
1.4 数据处理

所有试验重复 3 次取平均值。采用 Origin 8.6 软件绘图,SPSS 21.0 软件进行显著性分析。 $P < 0.05$ 代表差异显著。

2 结果与分析

2.1 电场处理对普鲁兰酶水解糯米淀粉的影响

由图 1 可知,当电场强度为 0.0~2.5 V/cm 时,还原糖含量从 0.50 g/L 增加至 0.53 g/L;但之后随着电场强度的进一步增加,还原糖含量逐渐降低;当电场强度为 5.0,7.5 V/cm 时,还原糖含量大于空白对照组,当电场强度为 10.0,12.5 V/cm 时,还原糖含量低于空白对照组。



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图1 电场强度对还原糖含量的影响

Figure 1 Effect of the intensity of the electric field on the content of reducing sugar

研究^[9,12]表明,低强度电场处理可改善酶活性,酶活性的增加可降低反应的活化能,有利于酶促反应的进行;而高强度电场处理会严重破坏酶分子的结构,使酶钝化。Barba 等^[16]发现,只有电场强度达到临界值(E_c)才可引起蛋白分子的极化:低强度作用下,蛋白分子沿着电场方向有序排列,但其结构变化较小;中强度电场可诱导蛋白分子极化,其内部的疏水基团外露;但随着电场强度进一步增加,极化蛋白分子间通过疏水相互作用络合,与试验结果高度契合。

2.2 电场辅助酶解对淀粉颗粒结构的影响

由图2可知,天然糯米淀粉颗粒形状不规则,大部分颗粒尺寸为4~5 μm ,与Li等^[17]的结果一致。经普鲁兰酶处理后,淀粉颗粒表面出现孔洞或裂缝,部分大颗粒被降解为小的片段,且小的片段间可能发生粘附。当电场强度为0.0 V/cm时,淀粉颗粒表面处有许多的裂缝和孔洞;当电场强度为2.5 V/cm时,由于酶解程度的增加,淀粉颗粒破坏增加,小的碎片发生聚集,形成了大颗粒;随着电场强度的进一步增加,淀粉酶解程度降低,淀粉表面依然存在裂缝和孔洞,但数目和尺寸减少。淀粉颗粒表面孔洞数目和尺寸的增加,将极大地提高淀粉的比表面

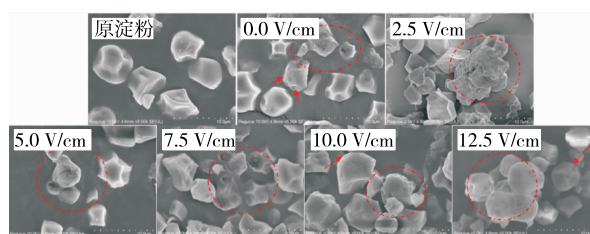


图2 电场辅助酶解对糯米淀粉扫描电镜图像的影响

Figure 2 Effect of the electro-assisted hydrolysis on the SEM image of waxy rice starch

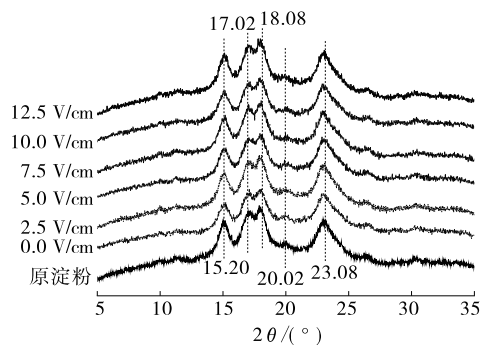
积,有利于运载功能性成分和用作吸附剂^[18-19]。低电场强度时,淀粉表面会出现孔洞和裂缝,酶解产物可用作多孔淀粉;而高电场强度时,淀粉颗粒结构被完全破坏,产物不能用作吸附剂使用^[17]。当电场强度为12.5 V/cm时,淀粉依然维持原有的颗粒结构,但表面孔洞和裂缝增加,是由于试验温度固定为50 $^{\circ}\text{C}$,消除了电场热效应影响的缘故^[20]。

2.3 电场辅助酶解对淀粉结晶结构的影响

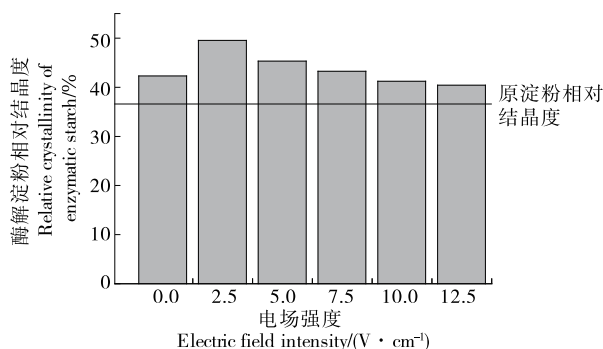
由图3可知,原糯米淀粉在15.02 $^{\circ}$,17.02 $^{\circ}$,18.08 $^{\circ}$,23.08 $^{\circ}$ 处出现衍射峰,属于典型的A型淀粉,与Li等^[17]的结果一致。电场辅助酶解后,糯米淀粉的结晶晶型未发生显著变化,但酶解淀粉的相对结晶度均高于原糯米淀粉。随着电场强度从0.0 V/cm增加至2.5 V/cm,糯米淀粉的相对结晶度从42.39%增加至49.66%;但随着电场强度的进一步增加,相对结晶度逐渐降低。淀粉颗粒是由疏松的无定形层和致密的结晶层交替排列形成的半刚性结构。在酶解过程中,酶分子优先水解疏松的无定形层,从而导致淀粉相对结晶度增加。Han等^[21-23]发现,电场处理可破坏淀粉的颗粒和半结晶结构,从而造成淀粉相对结晶度降低。

2.4 电场辅助酶解对淀粉热特性的影响

由图4可知,原糯米淀粉的DSC曲线上出现了两个吸热峰,第一个显著的吸热峰为支链淀粉熔融峰,第二个较微弱的吸热峰则归因于热稳定的直链淀粉-脂质复合



(a) X-射线衍射图谱



(b) 相对结晶度

图3 电场辅助酶解对糯米淀粉X-射线衍射图谱和相对结晶度的影响

Figure 3 Effect of the electro-assisted hydrolysis on the XRD pattern and relative crystallinity of waxy rice starch

物的熔化。一般情况下,淀粉相对结晶度增加代表淀粉结构有序性增加,破坏其结构所需要的能量会增加,体现在 DSC 曲线上即为糊化温度和焓值的增加。Abdorrezza 等^[24]报道,西米淀粉的糊化温度和焓值随酸解程度的增加而增加。由表 1 可知,随着电场强度的增加,糯米淀粉的 T_o 、 T_p 逐渐增加,但焓值变化不明显。这可能是电场加快了非结晶区的酶解效率,对结晶区破坏较小,焓值不变而糊化温度小幅度升高;其次,电场加快了支链部分的酶解,使直链淀粉比例增加,也会导致糊化温度增加。此外,糯米淀粉中含有少量的直链淀粉,该直链淀粉可与脂肪形成脂质复合物,脂质复合物的热稳定性较高,通常出现在 80 ℃ 左右。随着酶解的进行,第 2 个吸热峰位置和焓值并未发生显著变化,说明直链淀粉—脂质复合物的

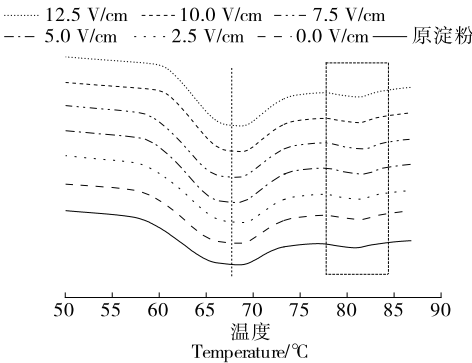


图 4 电场辅助酶解对糯米淀粉 DSC 曲线的影响
Figure 4 Effect of the electro-assisted hydrolysis on the DSC curves of waxy rice starch

表 1 电场辅助酶解对糯米淀粉 DSC 参数的影响 [†]								
Table 1 Effect of the electro-assisted hydrolysis on the DSC parameters of waxy rice starch								
电场强度/ (V · cm ⁻¹)	吸热峰 1				吸热峰 2			
	起始温度/℃	峰值温度/℃	终止温度/℃	ΔH/(J · g ⁻¹)	起始温度/℃	峰值温度/℃	终止温度/℃	ΔH/(J · g ⁻¹)
原淀粉	59.20±0.10 ^{cd}	66.25±0.15 ^b	76.62±0.09 ^{bc}	7.18±0.05	77.91±0.14	81.47±0.07	86.53±0.06 ^a	0.44±0.01
0.0	59.16±0.02 ^d	66.25±0.05 ^b	76.36±0.21 ^{bc}	6.75±0.37	77.93±0.22	81.37±0.41	86.33±0.15 ^{ab}	0.42±0.01
2.5	59.41±0.18 ^{cd}	66.37±0.05 ^b	76.17±0.08 ^{cd}	6.95±0.20	78.15±0.03	81.63±0.03	86.41±0.07 ^a	0.46±0.01
5.0	59.58±0.20 ^c	66.65±0.35 ^b	76.36±0.27 ^{bc}	6.87±0.40	78.52±0.06	81.94±0.61	85.86±0.11 ^c	0.43±0.04
7.5	60.13±0.19 ^b	66.71±0.20 ^b	75.88±0.05 ^d	7.14±0.31	78.30±0.03	81.82±0.03	86.02±0.22 ^{bc}	0.46±0.06
10.0	60.11±0.01 ^b	66.54±0.02 ^b	77.32±0.42 ^a	7.50±0.14	78.76±0.48	82.26±0.49	86.56±0.01 ^a	0.45±0.02
12.5	61.32±0.19 ^a	67.27±0.13 ^a	76.89±0.01 ^{ab}	6.91±0.35	77.86±0.82	81.35±0.58	86.49±0.15 ^a	0.44±0.06

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

含量未发生明显变化。

2.5 电场辅助酶解对淀粉糊化特性的影响

由图 5 和表 2 可知,淀粉酶解后,淀粉颗粒表面被破坏,吸水膨胀能力受限,淀粉糊的峰值黏度、谷值黏度、崩解值和最终黏度均降低。酶解程度越大,黏度降低越多。经 2.5 V/cm 电场辅助酶解后,淀粉糊黏度下降最多,峰值黏度从原淀粉的 1 852 mPa · s 降低至 1 153 mPa · s,崩解值从 616 mPa · s 降低至 324 mPa · s;而经 12.5 V/cm 电场处理后,淀粉糊黏度仅降低了 126 mPa · s,崩解值减少了 292 mPa · s,与还原糖结果一致。Polesi 等^[25]和 Ahmed 等^[26]研究发现,随着水解程度的增加,淀粉糊黏度逐渐降低。淀粉回生值主要与直链淀粉的泄露及重新聚集有关。研究^[27]表明,淀粉的改性会导致淀粉分子排列的规整性降低。酶解淀粉的回生值均低于原淀粉,是由于普鲁兰酶水解 α-1,6-糖苷键,切除支链后的淀粉分子排列规整性降低,原本的有序结构受到影响,直链淀粉重新缔合的速率减慢,回生值减小,与刘程玲等^[28]的结果相似。同时,淀粉损伤程度的增加将会导致淀粉糊化温度的降低^[29]。与原糯米淀粉相比,酶解淀粉的糊化温度略有上升,可能与酶解过程中优先水解无定形层导致的淀粉相对结晶度增加有关。

2.6 电场影响普鲁兰酶水解糯米淀粉的可能机制

由图 6(a)可知,当电场强度从 0.0 V/cm 增加到 5.0 V/cm 时,相对酶活性从 100% 增加到 116%;但随着电场强度的进一步增加,普鲁兰酶活性迅速降低。电场作用下,普鲁兰酶活性的变化趋势与淀粉酶解效率一致,说明试验条件下,酶活性的变化可能是导致淀粉酶解效率变化的主导因素。然而,在利用电场强化 α-淀粉酶水

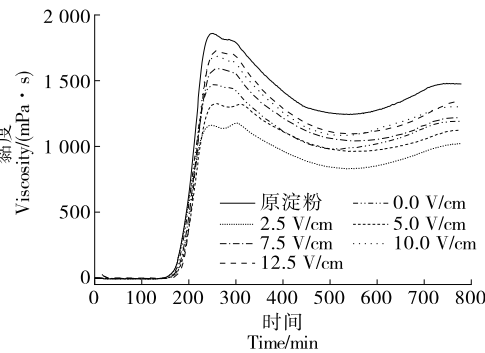


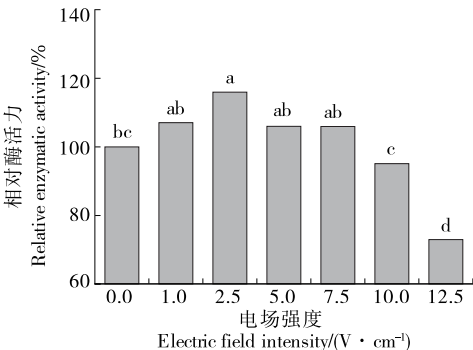
图 5 电场辅助酶解对糯米淀粉 RVA 曲线的影响
Figure 5 Effect of the electro-assisted hydrolysis on the RVA curves of waxy rice starch

表 2 电场辅助酶解对糯米淀粉 RVA 参数的影响[†]

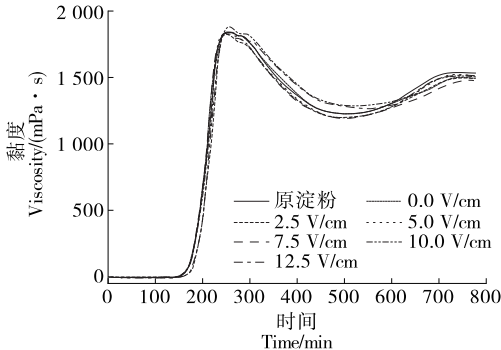
Table 2 Effect of the electro-assisted hydrolysis on the RVA parameters of waxy rice starch

电场强度/(V·cm ⁻¹)	峰值黏度/ (mPa·s)	谷值黏度/ (mPa·s)	崩解值/ (mPa·s)	终点黏度/ (mPa·s)	回生值/ (mPa·s)	糊化温度/℃	糊化时间/min
原淀粉	1 852±8 ^a	1 236±8 ^a	616±2 ^a	1 504±28 ^a	269±36 ^a	71.65±0.15 ^b	4.18±0.02 ^{bc}
0.0	1 485±14 ^d	984±4 ^{cd}	501±10 ^c	1 193±1 ^d	209±4 ^{ab}	72.38±0.18 ^{ab}	4.27±0.02 ^{bc}
2.5	1 153±49 ^f	828±6 ^e	324±42 ^d	998±25 ^f	170±18 ^{ab}	72.41±1.13 ^{ab}	5.11±0.12 ^a
5.0	1 326±12 ^e	962±3 ^d	364±7 ^d	1 125±2 ^e	163±4 ^c	73.01±0.62 ^{ab}	4.27±0.04 ^{bc}
7.5	1 571±21 ^c	1 012±30 ^c	559±9 ^b	1 221±1 ^{cd}	209±31 ^{ab}	72.68±0.43 ^{ab}	4.27±0.07 ^{bc}
10.0	1 600±28 ^c	1 077±8 ^b	584±21 ^b	1 270±33 ^c	194±26 ^{ab}	72.30±1.15 ^{ab}	4.10±0.20 ^{bc}
12.5	1 726±1 ^b	1 095±3 ^b	631±2 ^a	1 326±18 ^b	232±16 ^{ab}	73.88±0.03 ^a	4.36±0.06 ^b

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。



(a) 不同强度电场处理对普鲁兰酶相对酶活力的影响
字母不同表示差异显著($P<0.05$)



(b) 不同强度电场处理对糯米淀粉RVA曲线的影响
字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 6 电场影响普鲁兰酶水解糯米淀粉的可能机制

Figure 6 Possible mechanism of the electro-assisted hydrolysis of waxy rice starch in the presence of pullulanase

解玉米淀粉的试验中,电场对淀粉酶解效率的影响与 α -淀粉酶活力的变化趋势并不一致,而淀粉结构变化对电场强化淀粉酶解效率的影响极为显著^[17]。这可能是由于前期试验条件中,未控制电场处理的温度且缓冲液浓度较高(0.2 mol/L),随着电场强度和處理时间的增加,淀粉酶解液的温度逐渐上升,淀粉颗粒结构被部分破坏,淀粉分子从颗粒内部泄露,与淀粉酶间的亲和力增加。而该试验中,处理温度控制在 50℃且缓冲液浓度低(0.04 mol/L),电场热效应可忽略。

淀粉颗粒和结晶结构的微小破损即可显著影响淀粉的吸水膨胀,从而导致淀粉糊黏度的降低。为了进一步明确电场对普鲁兰酶水解糯米淀粉的作用机理,测定了电场作用下淀粉的糊化性质变化(不加普鲁兰酶)。由图 6(b)可知,不同电场处理后,淀粉的糊化曲线近乎重叠,证实电场处理并未能对糊化结构性性质造成显著影响。因此,试验条件下,电场作用下淀粉结构性性质变化可能并非是影响普鲁兰酶水解糯米淀粉效率的关键因素。但值得注意的是,由于电场拥有物质所具有的力和能量的客观属性,会对处于其中的物质产生力及能量的作用^[30]。因此,电场作用于酶解反应时,可能会赋予淀粉酶解中间

产物(碳正离子)反应基团动能,使官能团中的原子和电荷活跃度更高,更易参加反应。

3 结论

探究了不同强度电场作用下糯米淀粉水解效率、普鲁兰酶活力、糯米淀粉结构性质的变化规律。结果表明,强度 ≤ 2.5 V/cm 的电场可改善普鲁兰酶的活力,从而加速糯米淀粉的酶解速率;强度 ≥ 5 V/cm 的电场则导致酶活力的降低,酶解效率降低。随着酶解的进行,淀粉颗粒表面逐渐出现孔洞、裂缝、破裂及小片段的聚集等现象。电场辅助酶解不会改变淀粉的结晶晶型,但相对结晶度增加;且酶解程度越高,相对结晶度越大。电场辅助酶解后,糯米淀粉第 1 个糊化峰的起始温度增加,但第 2 个糊化峰的起始温度以及糊化焓均未发生显著变化。淀粉的峰值黏度、谷值黏度、终点黏度、崩解值和回生值经酶解后均显著降低,且酶解程度越高,黏度下降越多。试验条件下,电场对淀粉结构性质的影响不显著,说明电场对普鲁兰酶水解糯米淀粉的作用主要与酶活力的变化相关。而对于电场处理影响普鲁兰酶活性的原因尚不清楚,还需进一步研究。

参考文献

- [1] WHISTLER R L, BEMILLER J N, PASCHALL E F. Starch: Chemistry and technology[M]. San Diego: Academic Press, 2012: 1-10.
- [2] 徐舒简, 李兆丰. 面条制品常用淀粉及其衍生物研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(6): 208-213, 219.
XU S J, LI Z F. Research progress on starch and its derivatives in noodles[J]. Food & Machinery, 2020, 36(6): 208-213, 219.
- [3] 蒋黎明, 陶阳, 韩永斌, 等. 中强电场对 α -淀粉酶水解玉米淀粉的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(1): 80-86.
JIANG L M, TAO Y, HAN Y B, et al. Effect of moderate electric field on α -amylase-catalyzed hydrolysis of corn starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(1): 80-86.
- [4] KRISHNAN V, AWANA M, SAMOTA M K, et al. Pullulanase activity: A novel indicator of inherent resistant starch in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 152: 1 213-1 223.
- [5] 龙杰. 新型磁性纳米复合物的制备及其在普鲁兰酶固定化方面的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 1-19.
LONG J. The research on synthesis of novel magnetic nanocomposites and their application for pullulanase immobilization[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016: 1-19.
- [6] 张焕新. 抗性淀粉酶法制备及其特性与应用的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 13-20.
ZHANG H X. The preparation and application of resistant starch with a combination of α -amylase and pullulanase[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012: 13-20.
- [7] 李敏, 吴卫国, 杨韵. 普鲁兰酶对甘薯淀粉糊化回生特性影响研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 44-48.
LI M, WU W G, YANG Y. Effect of pullulanase on pasting and retrograded properties of sweet potato starch[J]. Food & Machinery, 2014, 30(2): 44-48.
- [8] 李光耀, 李林波, 杨天佑, 等. 物理场预处理对淀粉改性及其多尺度结构的影响研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 213-218.
LI G Y, LI L B, YANG T Y, et al. Advances in effects of physical field pretreatment on starch modification and its multi-scale structure[J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 213-218.
- [9] ZHAO W, YANG R, ZHANG H Q. Recent advances in the action of pulsed electric fields on enzymes and food component proteins[J]. Trends in Food Science & Technology, 2012, 27(2): 83-96.
- [10] SAMARANAYAKE C P, SASTRY S K. In-situ activity of α -amylase in the presence of controlled-frequency moderate electric fields[J]. LWT-Food Science & Technology, 2018, 90: 448-454.
- [11] DURHAM E K, SASTRY S K. Moderate electric field treatment enhances enzymatic hydrolysis of cellulose at below-optimal temperatures[J]. Enzyme & Microbial Technology, 2020, 142: 109678.
- [12] OHSHIMA T, TAMURA T, SATO M. Influence of pulsed electric field on various enzyme activities[J]. Journal of Electrostatics, 2007, 65(3): 156-161.
- [13] HEMOUXVILLIERE A, LASSI U, HU T, et al. Simultaneous microwave/ultrasound-assisted hydrolysis of starch-based industrial waste into reducing sugars[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2013(8): 995-1 002.
- [14] LI D, YANG N, ZHOU X, et al. Characterization of acid hydrolysis of granular potato starch under induced electric field[J]. Food Hydrocolloids 2017, 71: 198-206.
- [15] LI D, YANG N, JIN Y, et al. Changes in crystal structure and physicochemical properties of potato starch treated by induced electric field[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 153: 535-541.
- [16] BARBA F J, PARNIAKOV O, PEREIRA S A, et al. Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry[J]. Food Research International, 2015, 77: 773-798.
- [17] LI D, TAO Y, SHI Y, et al. Preparation of porous starch by α -amylase-catalyzed hydrolysis under a moderate electric field[J]. LWT-Food Science & Technology, 2021, 137: 110449.
- [18] BENAVENT-GIL Y, ROSELL C M. Comparison of porous starches obtained from different enzyme types and levels[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 157: 533-540.
- [19] BENAVENT-GIL Y, ROSELL C M. Morphological and physicochemical characterization of porous starches obtained from different botanical sources and amylolytic enzymes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 103: 587-595.
- [20] LI D, HUANG Y, TAO Y, et al. Effect of metal salts on α -amylase-catalyzed hydrolysis of broken rice under a moderate electric field[J]. Food Research International, 2020, 137: 109707.
- [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(4): 1 012-1 017.
- [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 & Emerging Technologies, 2009, 10(4): 481-485.
- [23] 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(3): 318-323.
- [24] ABDORREZA M N, ROBAL M, CHENG L H, et al. Physicochemical, thermal, and rheological properties of acid-hydrolyzed sago (*Metroxylon sagu*) starch[J]. LWT-Food Science & Technology, 2012, 46(1): 140-141.
- [25] POLES I L F, SARMENTO S. Structural and physicochemical characterization of RS prepared using hydrolysis and heat treatments of chickpea starch[J]. Starch-Stärke, 2011, 63(4): 226-235.
- [26] AHMED J, AURAS R. Effect of acid hydrolysis on rheological and thermal characteristics of lentil starch slurry[J]. LWT-Food Science & Technology, 2011, 44(4): 976-983.
- [27] 戚汝斌. 淀粉在造纸工业中的应用[J]. 广西轻工业, 2001(3): 12-14.
QI R B. Application of starch in papermaking industry[J]. Light Industry Science and Technology, 2001(3): 12-14.

(下转第 67 页)