感应电场加速玉米淀粉酸解及理化特性研究

周宇益[1]，杨 哪[1]，金亚美[1]，李丹丹[1]，徐学明[1,2,3]，谢正军[*1,2,3]，童群义[1]

（1. 江南大学 食品学院，江苏 无锡 214122；2. 食品科学与技术国家重点实验室，江南大学，江苏 无锡 214122；
3. 江南大学 协同创新中心，江苏 无锡 214122）

摘要：利用感应电场对玉米淀粉进行酸解处理并考察了理化性质的变化，研究了感应电场辅助酸解过程中的电压频率及酸溶液浓度和淀粉乳质量浓度对酸解淀粉的影响，并采用差示扫描量热仪和多角度凝胶色谱等对其改性后的淀粉性质进行了研究。结果发现，玉米淀粉在感应电场的影响下，降解时产生的还原糖均高于不施加感应电场的对照样，并且在 0.15 mol/L 的酸浓度和 8 g/dL 淀粉乳的条件下，与对照样的差异显著（$P<0.05$），还原糖质量浓度分别提高了 52.07% 和 42.38%；感应电场处理的淀粉糊化温度和焓值相较于热酸处理的对照样均有所减小（$P<0.05$），反应 15 h 以后，感应电场辅助处理的淀粉相对分子质量下降更快。

关键词：感应电场；酸解反应；玉米淀粉；理化性质

中图分类号：TS 236.9　**文章编号**：1673-1689(2019)05-0140-07　**DOI**：10.3969/j.issn. 1673-1689.2019.05.020

Study on Inducted Electric Field Enhancing Acid Hydrolysis of Corn Starch and Its and Physicochemical Properties

ZHOU Yuyi[1]，*YANG Na*[1]，*JIN Yamei*[1]，*LI Dandan*[1]，
XU Xueming[1,2,3]，*XIE Zhengjun*[*1,2,3]，*TONG Qunyi*[1]

（1. School of Food Science and Technology，Jiangnan University，Wuxi 214122，China；2. The State Key Laboratory of Food Science and Technology，Jiangnan University，Wuxi 214122，China；3. Synergetic Innovation Center，Jiangnan University，Wuxi 214122，China）

Abstract：In the present research，the effects of inductive methodology treating on the acid hydrolyzed corn starch were studied by changing the frequency of voltage，concentration of acid solution and starch suspension. The content of reducing sugar，differential scanning calorimetry（DSC）and Laser multi-angle gel chromatography system were used to analyze the influences on properties of corn starch after alternating electric field assisted acid hydrolysis. The reducing sugar content produced by acid hydrolysis assisting by electric field was higher than non-electric field samples. And in 0.15mol/L acid and 8% starch suspension，the reducing sugar yield could increase by 52.07% and 42.38% than controls（$P<0.05$），respectively. Compared to the non-electric field acid starch，gelatinization temperature and enthalpy were a bit reduced（$P<0.05$），and the molecular

收稿日期：2016-07-09

基金项目：江苏省科技计划项目（SBY2016020288）。

* **通信作者**：谢正军（1964—），男，博士，副教授，主要从事新型食品加工技术研究。E-mail：xiezj@jiangnan.edu.cn

引用本文：周宇益，杨哪，金亚美，等. 感应电场加速玉米淀粉酸解及理化特性研究[J]. 食品与生物技术学报，2019，38(05)：140-146.

weight decreased faster after 15 h treating with electric field.
Keywords: alternating electric field, acid hydrolysis, corn starch, property

淀粉作为一种天然的高分子化合物具有来源广泛，可降解等优点[1-2]，同时，它也是食品、生物和医药工业的一种重要原料。关于淀粉水解的方法主要以物理法、化学法和生物酶法为主，为了提高淀粉水解效率，研究人员采用了各种新的辅助水解技术，包括微波[3]辅助酸解、超声波[4-5]辅助酸解、脉冲电场[6]辅助酸解。周美等[7]人采用微波手段辅助柠檬酸与马铃薯淀粉水解合成柠檬酸淀粉酯，并发现当pH 值为 3.48、微波时间 7 min、功率 640 W 时，即可制得吸水率为 760.83%的柠檬酸淀粉酯。叶文峰等[8]人以新鲜脚板薯为主要原料，采用超声波及酸处理粗淀粉制备抗性淀粉，加入质量分数 1.5%的 2 mol /L 盐酸，在超声温度为 80 ℃、超声时间为 40 min，制备的抗性淀粉得率为 25.3%。曾新安等[9]人以木薯淀粉为原料，乙酸酐添加量为质量分数 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应的进行，提高了酯化反应效率。Hamit Köksel 等[10]采用了酸和热结合的方法研究抗性淀粉(RS)，发现酸解和蒸汽压力灭菌使得 RS 的质量分数从 13.6%增加到 16.7%。

目前，现有的电场加工技术都使用了通电的电极且直接与料液接触，在长时间加工过程中容易造成电极表面的腐蚀和重金属泄露，进而造成料液的污染。利用安培环路定律，Pryor[11]采用单相变压器系统对海水的电导率进行了仿真检测，表明当含有自由离子的溶液作为变压器的次级线圈时，在初级线圈施加交变电压后，同样可在溶液中得到交变的感应电压和感应电流，其感应电流与海水阻抗成反比；根据此原理 Jin Yamei 等[12]搭建了单相变压器试验系统，并以盐渍黄瓜汁液作为次级线圈，同样发现当施加交变电压激励初级线圈后，黄瓜汁液中有明显的离子传导加剧现象，从而造成固形物的快速凝聚结团，同时终端电压也可被检测。Yang Na 等[13]利用感应电场辅助提取橘皮果胶，发现利用酸溶液作为次级线圈时，当增加激励电压时，果胶的提取得率也相应提高，但频率过高会使初级线圈的阻抗增加，对果胶提取反而不利，次级线圈溶液阻抗低更有利于提取。

玉米是世界主要的粮食作物之一，来源广泛。酸解玉米淀粉产物，如还原糖在发酵、化工、能源和食品领域都有广泛的应用。作者将玉米淀粉和盐酸溶液作为变压器的次级线圈，初级线圈施加交流电压后，在次级线圈中得到交变感应电压，加速体系中的自由离子传导作用，从而对淀粉分子表面以及内部结构造成一定程度的影响。采用搭建的感应电场流体系统对玉米淀粉进行辅助酸水解，同时以常规的酸法热处理作为对照，考察电场频率，酸溶液浓度和淀粉乳浓度对淀粉性质的影响，该方法可以避免使用通电的电极和极板，从而不会有极板表面的离子极化现象发生，区别于现在各类的电场加工技术。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

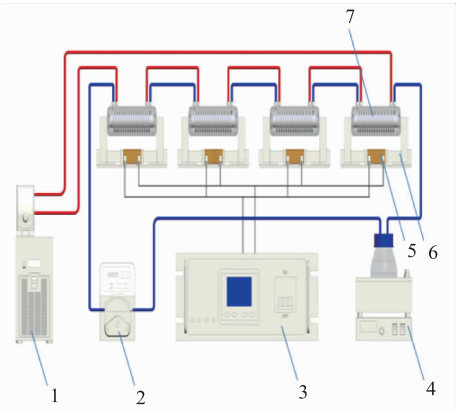
1.1.1 试验材料 玉米淀粉：无锡闵农公司产品；水分质量分数 12.5%，直链支链淀粉质量比为 26∶74；盐酸(AR)：上海国药试剂有限公司产品。

1.1.2 试验仪器 感应电场流体系统：自建(专利申请号 201510584007.7)；台式低速离心机：无锡瑞江分析仪器有限公司产品；V-1800 紫外分光光度计：上海美谱达仪器有限公司产品；X-DSC7000 差示扫描量热仪：日本精工电子纳米科技有限公司产品；DAWN HELEOS Ⅱ多角度激光光散射凝胶色谱系统：美国怀雅特技术公司产品。

1.1.3 试验装置及原理 系统如图 1 所示，包括变频电源；恒温循环水浴；蠕动泵；感应电动势系统；磁力搅拌水浴锅。

反应溶液置于磁力搅拌水浴的试剂瓶中，进样时，反应溶液由蠕动泵泵入反应腔体中，充满反应腔体(次级线圈支撑物)直到重新流入反应样品瓶中，保证溶液形成回路且无任何气泡。工作时，采用变频电源施加不同频率 (50~700 Hz) 和不同电压(0~150 V)的信号到初级线圈(N_P = 65)，于是在硅钢铁芯中得交变的磁通量，并在铁芯另一侧缠绕的次级线圈(玻璃弹簧，N_S = 23)导体(盐酸-玉米淀粉

料液)中得到交变的感应电场,由于体系中含有大量的带电离子如 H^+和 Cl^-,从而对玻璃弹簧中的玉米淀粉进行处理,以达到辅助玉米淀粉水解的目的。流动样品的玻璃弹簧外侧具有夹套层,可让不同温度的循环水通过以达到控制体系温度的目的。



1.恒温循环水浴;2.蠕动泵;3.变频电源;4.磁力搅拌水浴锅;5.初级线圈;6.硅钢铁芯片;7.次级线圈

图 1 系统布局示意图

Fig. 1 Layout of instrumental system

由于反应腔体中的样品受到交变电场的作用,造成体系中的带电离子如 H^+发生定向迁移。感应电动势系统是基于变压器体系的装置,其中 U_P 为初级线圈激励电压(V),E_P 为初级线圈感应电压(V),E_S 为初级线圈感应电压(V),U_S 为初级线圈激励电压(V),N_P 为初级线圈匝数,N_S 为次级线圈匝数,根据单相变压器特性,它们之间的关系为式(1)

$$\frac{E_P}{E_S}=\frac{U_P}{U_S}=\frac{N_P}{N_S} \quad (1)$$

反应体系的输入功率为式(2)

$$P=\frac{U_P^2}{Z_P^2} \quad (2)$$

式中:P 为输出功率,W;Z_P 为初级线圈阻抗,Ω。

这时的系统,次级线圈中的盐酸-玉米淀粉体系存在阻抗即作为"电源"的内阻 Z_S,由于溶液不存在感抗 X_L,且次级线圈中的溶液没有联通即没有形成闭合的回路状态,所以感应电压作为"源动力"全部施加在玻璃弹簧中的玉米淀粉-盐酸溶液中。

1.2 试验方法

1.2.1 感应电场处理 称取一定量的玉米淀粉与盐酸溶液配成淀粉乳,混匀。将烧杯中混合好的淀粉乳泵入反应腔体中,流动的反应溶液在体系中形成回路,然后在不同的条件下进行玉米淀粉的电场辅助水解,其中激励电压 150 V(激励电流都为 1 A,正弦波),温度为 50 ℃,电场频率 400、550、700 Hz,盐酸浓度为 0.15,0.5,1.5 mol/L,淀粉乳质量浓度为 8、16、24 g/dL,泵转速为 45 r/min,每隔一定反应时间取 4 mL 的混合液,时间到后将溶液冷却到室温,用 1.0 mol/L 的 NaOH 调节 pH 到 7.0,淀粉离心后,上清液留待分析时测用,淀粉沉淀洗涤后至于 40 ℃烘箱烘干,粉碎,过 80 目筛,于 4 ℃冰箱保存。相同条件下,采用相同条件下不施加交变感应电场的样品作为对照。

1.2.2 还原糖的测定 采用 DNS 法[14](3,5-二硝基水杨酸比色法)测得处理过程中的还原糖质量浓度的变化。取 1.0 mL 待测液测定,根据样品吸光度值查标准曲线或由回归方程求出所取试液中还原糖质量浓度(g/L)。

1.2.3 玉米淀粉的热特性测定(DSC) 称取 1 g 淀粉与 2 mL 水,置于普通铝盘中,搅拌均匀制成共混溶液,密封,静置 24 h 后,用于 DSC 测试。DSC 测试前,使用金属铟和锌的熔融温度和熔融焓对仪器进行温度和焓值标定。试验中采用的升温区间为 20~90 ℃,升温速率为 10 ℃/min。试验过程中的载气为氮气,流速为 10 mL/min。每个样品均进行 3 次平行测试并取平均值[15]。

1.2.4 玉米淀粉相对分子质量测定 称取 20 mg 淀粉样品,溶解在 5 mL 二甲亚砜(DMSO)中,沸水浴 1 h 至溶液透明,于室温下继续搅拌 12 h。对于相对分子质量分布的测定,取 1 mL 溶液,加入 6 mL 无水乙醇进行沉淀,4 000 *g* 离心 10 min,向沉淀中加入 4 mL 煮沸的流动相,沸水浴 30 min,间或振荡以保证完全溶解。将上述溶液趁热经 0.45 μm 的尼龙微孔膜过滤,注入多角度激光凝胶色谱(GPC)进行分析。选用 Shodex OHpak SB-806 HQ 色谱柱和 OHpak SB-804 HQ 色谱柱串联,流动相 0.1 mol/L $NaNO_3$ 溶液并含有质量分数 0.02%叠氮化钠,流量 0.6 mL/min,柱温 50 ℃,分析时间为 60 min[16]。

1.2.5 数据统计分析 各组实验数据均重复 3 次,用 SPSS 22.0 进行分析,Origin 9.0 作图。

2 结果与讨论

2.1 感应电动势辅助玉米淀粉酸解的还原糖质量浓度

2.1.1 电压频率对酸解玉米淀粉还原糖的影响 将 40 g 玉米淀粉与 0.15 mol/L 的盐酸配成 8 g/dL

的淀粉乳，在 50 ℃、150 V 的条件下，分别与 400、550、700 Hz 的激励电压的感应电场复合方式处理玉米淀粉，并与不加感应电场的同条件酸解方式进行对比，每 6 h 取一次样，反应 60 h，图 2 显示次级线圈在不同频率下对玉米淀粉酸解还原糖浓度的影响，可以发现，随着频率的增强，淀粉酸解产生的还原糖的质量浓度也随之增加，施加感应电场状态下的淀粉在酸解 60 h 后得到的还原糖质量浓度，比不施加感应电场的对照样分别提高 52.07%，65.75% 和 75.04%。这是可能是因为当体系频率增大时，体系的有效输出功率也相应增大，使得玉米淀粉颗粒表面的致密结构进一步破坏，在交变电场力的作用下带电离子更易进入到颗粒内部，使其分解为小分子单糖、多糖等。

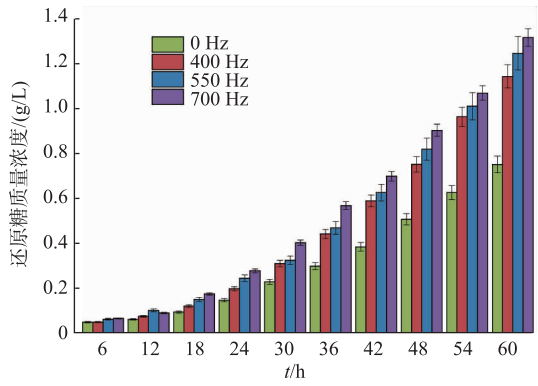


图 2　电场频率对酸解玉米淀粉还原糖的影响

Fig. 2　Effects of electric field frequency on reducing sugar content of acid hydrolyzed corn starch

然而，就整体上来说，低频段频率的提高对其水解得到还原糖质量浓度的增加并不显著，且低频段过高的频率会产生较大的噪音，因此后续将采用 400 Hz 作为实验的频率条件。

2.1.2　酸浓度对酸解玉米淀粉还原糖的影响　将 40 g 玉米淀粉分别与 0.15、0.5、1.5 mol/L 的盐酸配成 8 g/dL 的淀粉乳，在 50 ℃条件下，利用 45 r/min 蠕动泵与 400 Hz，150 V 激励电压的感应电场复合方式处理玉米淀粉，并与相同条件下不加感应电场的酸解方式性对比，图 3 所示即为不同的盐酸浓度对感应电场辅助玉米淀粉酸解的影响，可以发现，随着酸浓度的增加，还原糖的质量浓度也有显著的提高。相同条件下，1.5 mol/L 的盐酸反应产生的还原糖质量浓度相较于 0.15 mol/L 和 0.5 mol/L 的分别提高了 3958.45%，359.08%。然而，0.15 mol/L 和 0.5 mol/L 的样品比相应的对照分别提高了 52.07% 和 42.38%，相较于 1.5 mol/L 只提高的 17.17%，效果显然更加明显。当酸浓度增加时，整个酸解淀粉体系中的自由离子 H^+、Cl^-的浓度随之增加，在相同的交变电场作用下，系统的输入功率提高，离子传导进一步增强，带电离子的增多加速了玉米淀粉的酸解，离子对于淀粉的非结晶区作用增强，使淀粉分子的直支链断裂情况更加明显，能量相对低的、非结晶区受到破坏，变得更加均一、稳定，淀粉的酸解更加完全，更容易生成小分子糖等。然而，在 50 ℃的条件下，酸浓度的增大，使得自由离子的热运动也更加明显，感应电场的辅助作用能力并不明显，样品与空白对照的差异性也相对较小，因此，在后续的实验中将主要采用 0.15 mol/L 以及 0.5 mol/L 的盐酸浓度。

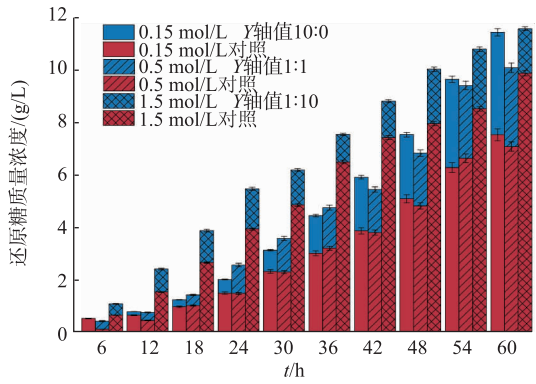


图 3　酸浓度对酸解玉米淀粉还原糖的影响

Fig. 3　Effects of acidic concentration on reducing sugar content of acid hydrolyzed corn starch

2.1.3　淀粉乳质量浓度对酸解玉米淀粉还原糖的影响　将 0.5 mol/L 分别与 40、80、120 g 玉米淀粉配成 8、16、24 g/dL 的淀粉乳，在 50 ℃条件下，利用 45 r/min 蠕动泵与 400 Hz，150 V 激励电压的感应电场复合方式处理玉米淀粉，并与相同条件下不加感应电场的酸解方式性对比，图 4 所示即为不同的淀粉乳质量浓度对感应电场辅助玉米淀粉酸解的影响，可以发现，质量浓度增加使得还原糖质量浓度也相应增加，但增加的幅度并非成倍增加，而是逐渐降低的，分别为 42.38%，38.50% 和 17.39%。推测可能是当体系自由离子数量一致时，当淀粉乳的浓度增加，淀粉分子与 H^+、Cl^-等带电离子之间的距离缩短，交变电场不会显著影响酸溶液中的自由离子对于淀粉非结晶区的作用，致使水解产生的还原

糖含量的增幅也随之减小。因此,在低浓度的环境下,交变电场能加速带电离子与淀粉分子之间的碰撞,破坏淀粉的非结晶区,提高淀粉的水解程度,增加淀粉的还原糖质量浓度。

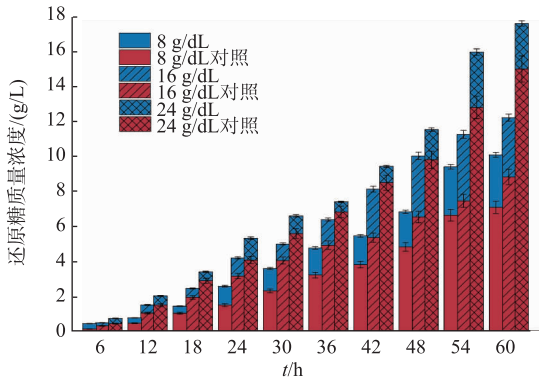


图 4　淀粉乳质量浓度对酸解玉米淀粉还原糖的影响

Fig. 4　Effects of starch suspension concentration on reducing sugar content of acid hydrolyzed corn starch

2.2　玉米淀粉的热特性分析(DSC)

采用 DSC 研究了不同频率电压下的感应电场对酸解玉米淀粉的热特性影响。淀粉的糊化温度和焓值与其颗粒大小、微观结构、结晶区域和链支比等相关。

不同频率感应电场影响下的酸解玉米淀粉的热力学特征值变化不显著(P>0.05),T_o/T_p 由原淀粉的 68.52/72.30 分别变为 68.11/75.71、67.83/75.55、68.64/75.75、68.64/75.81,但随着电压频率的增加,其糊化焓值略有下降。结果见表 1。

随着时间的改变,玉米淀粉的 T_o、T_p、T_c、R 和 ΔH 都有改变,相较于原淀粉的热量变化,酸解处理导致糊化峰值温度升高,T_p 从原淀粉的 72.30 ℃变化为对照组的 73.21~75.71 ℃和施加感应电场的 72.70~75.55 ℃,ΔH 从原淀粉的 14.21 J/g 变化为对照组的 14.18~18.80 J/g 和施加感应电场样品的 12.59~14.57 J/g,在整个反应过程中,每个时间段施加感应电场的样品的糊化温度,糊化焓值均小于相应的对照组。结果见表 2。

所有的样品较原淀粉,其糊化峰值温度均有提高,这是因为玉米淀粉经酸解后造成玉米淀粉分子聚合度减小,增加了分子间相互形成氢键的能力,淀粉分子的有序性和结晶性增加,使得淀粉的糊化温度上升,但水解过程采用的盐酸浓度相对较低,使得其糊化温度略微升高。同时,酸解处理后形成的晶体具有多相性,使得温度的相变范围变宽,然

表 1　玉米淀粉在不同频率感应电场影响下的 DSC 热流参数值

Table 1　DSC measurements for gelatinization properties of acidic hydrolysis corn starches subjected to different electric field frequency and the native corn starch

样品	T_o/℃	T_p/℃	R/℃	ΔH/(J/g)
原淀粉	68.52±0.50^a	72.30±0.17^a	7.80±0.43^a	14.21±0.14^a
0 Hz(60 h)	68.11±0.84^a	75.71±0.04^c	17.93±1.15^c	14.80±2.79^b
400 Hz(60 h)	67.83±0.25^b	75.55±0.10^b	16.89±0.94^c	14.57±0.53^a
550 Hz(60 h)	68.64±0.26^c	75.75±0.13^d	15.84±2.11^a	14.54±0.42^a
700 Hz(60 h)	68.64±0.27^a	75.81±0.07^c	14.36±1.49^b	14.47±0.40^a

表 2　玉米淀粉在不同感应电场处理时间下的 DSC 热流参数值

Table 2　DSC measurements for gelatinization properties of different alternating electric field treating time of acid corn starches and the native corn starch

样品	T_o/℃	T_p/℃	R/℃	ΔH/(J/g)
原淀粉	68.52±0.50^a	72.30±0.17^a	7.80±0.43^a	14.21±0.14^a
0 V(15 h)	69.64±0.22^c	73.21±0.23^b	7.08±0.22^a	14.18±0.25^a
0 V(30 h)	69.86±0.39^d	74.90±0.24^d	8.74±0.69^b	16.46±4.72^b
0 V(45 h)	68.86±0.30e	75.37±0.21^f	14.77±0.47^d	12.78±1.14^a
0 V(60 h)	68.11±0.84^a	75.71±0.04^f	17.93±1.15^g	18.80±2.79^b
150 V(15 h)	69.72±0.16^d	72.70±0.10^c	6.94±0.49^a	12.59±1.92^a
150 V(30 h)	69.18±0.23^c	74.67±0.32^e	9.32±1.23^c	11.16±0.89^a
150 V(45 h)	68.41±0.14^d	75.03±0.11^f	14.11±1.07^e	12.29±1.06^a
150 V(60 h)	67.83±0.25^b	75.55±0.17^f	17.19±0.94^f	14.57±0.53^a

而，增加物理搅拌方式处理的玉米淀粉分子间的氢键形成的能力减弱，同时可能破坏了部分结晶区，能轻微的降低糊化温度，且其糊化焓也有所降低，可以发现体系受到感应电场的作用后能更显著的降低其氢键作用力，说明玉米淀粉的结晶区外层的支链淀粉被破坏，在 DSC 加热阶段，水分更容易进入淀粉的结晶区域与淀粉分子发生反应，导致糊化温度和焓值降低。

2.3 酸解玉米淀粉的相对分子质量

通过 GPC 测得玉米淀粉的重均相对分子质量（M_w）为 5.443e+7，数均相对分子质量（M_n）为 4.448e+7。经过单纯的酸解 30 h 后，玉米淀粉的 M_w 下降到 1.049e+6，M_n 则为 4.031e+5，而经过感应电场辅助处理的酸解淀粉其 M_w 急剧下降到 7.619e+5，M_n 也下降到 2.715e+5，施加感应电场的处理方法使得酸解玉米淀粉的相对分子质量有较为明显的下降，淀粉水解的更为充分，随着反应时间的进一步延长，样品间的 M_w，M_n 的差异逐渐减小。

从表 3 和表 4 中可以发现，改变体系的电场频率所呈现的趋势基本相同。感应电场的施加使得酸解淀粉的 M_w 和 M_n 都有明显的下降，淀粉有明显的降解，并且随着频率的升高，淀粉的相对分子质量呈现先下降后上升的趋势。多分散性系数 PI（M_w/M_n）可以表征淀粉的多分散性程度，当 PI 越接近 1，表明淀粉体系相对分子质量分布窄，分子尺寸越均一，相对分子质量的差异越大，则 M_w/M_n 的比值越大，表中可以发现，随着电场频率的增加，其多分散性程度呈现逐渐减小的趋势，淀粉体系中的分子尺寸更加均一。

表 3 原淀粉和不同频率感应电场处理下的酸解玉米淀粉的相对分子质量特征值

Table 3 Molecular characteristics of acid hydrolysis corn starches subjected to different electric field frequency and the native corn starch

项目	M_W	M_n	M_w/M_n
原淀粉	5.443e+7(5%)	4.448e+7(5%)	1.224(7%)
0 Hz(60 h)	3.119e+5(2%)	1.307e+5(4%)	2.387(5%)
400 Hz(60 h)	3.039e+5(4%)	1.620e+5(6%)	1.876(7%)
550 Hz(60 h)	3.089e+5(8%)	1.678e+5(8%)	1.841(11%)
700 Hz(60 h)	3.340e+5(7%)	1.831e+5(7%)	1.824(10%)

表 4 原淀粉和不同时间感应电场处理下的酸解玉米淀粉的相对分子质量特征值

Table 4 Molecular characteristics of acidic hydrolysis corn starches subjected to different electric field frequency and the native corn starch

项目	M_W	M_n	M_w/M_n
原淀粉	5.443e+7(5%)	4.448e+7(5%)	1.224(7%)
0 V(15 h)	2.475e+6(2%)	5.643e+5(8%)	4.387(8%)
0 V(30 h)	1.049e+6(4%)	4.031e+5(12%)	2.602(13%)
0 V(45 h)	4.741e+5(2%)	1.440e+5(4%)	3.293(4%)
0 V(60 h)	3.119e+5(2%)	1.307e+5(4%)	2.387(5%)
150 V(15 h)	2.182e+6(2%)	5.848e+5(2%)	3.731(2%)
150 V(30 h)	7.619e+5(1%)	2.715e+5(4%)	2.806(4%)
150 V(45 h)	3.307e+5(2%)	1.012e+5(3%)	3.269(4%)
150 V(60 h)	3.039e+5(4%)	1.620e+5(6%)	1.876(7%)

酸解处理过程中，当反应 15 h 以后，玉米淀粉的相对分子质量有明显减小，这可能主要是因为盐酸在 15 h 内能更深入的扩散至淀粉颗粒内部，并且开始降解支链淀粉，从而导致淀粉平均相对分子质量急剧下降。所以感应电场辅助处理的酸解玉米其平均相对分子质量降低程度更加明显，且 30 h 几乎能实现与普通酸解处理 30 h 达到相似的平均相对分子质量水平。这也说明感应电场能加速淀粉的酸解过程。

3 结 语

利用基于单相变压器结构的试验系统将淀粉乳酸溶液作为次级线圈，通过改变体系的电场频率、酸溶液浓度、淀粉乳质量浓度等条件，对感应电场辅助酸解处理的玉米淀粉进行分析，发现感应电场频率的变化对酸解处理玉米淀粉的理化影响不显著。此外，酸浓度和淀粉乳质量浓度增大，使得溶液中带电离子的热运动也更加明显，交变感应电场的施加并不会显著影响酸溶液中的带电离子对于淀粉非结晶区的作用，致使水解产生的还原糖含量的增幅也随之减小。在适宜的酸浓度和淀粉乳条件下，交变电场加速自由离子与淀粉分子之间的碰撞，破坏淀粉的非结晶区，提高淀粉的水解程度，增加淀粉的还原糖质量浓度。

通过 DSC 和相对分子质量分析可知，经过感应电场酸解处理，能够加速淀粉的水解，其相对分子质量降低的更快，淀粉颗粒被破坏，并且相较于不施加感应电场的对照样，其糊化温度和焓值也有所减小。

参考文献:

[1] SINGH N,SINGH J,KAUR L,et al. Morphological,thermal and rheological properties of starches from different botanical sources[J]. **Food Chemistry**,2003,81(2):219-231.

[2] ZUO Yingfeng,GU Jiyou,ZHANG Yanhua,et al. Effect of acid hydrolysis temperature and time on properties of corn starch[J]. **Journal of Southwest Forestry University**,2012(5):107-110.(in Chinese)

[3] YUAN Shasha,XIE Yanli,WANG Jinshui. The advance of the microwave on starch character's effect [J]. **Food Science and Technology**,2011(7):242-243.(in Chinese)

[4] KANG Guangbo,YUAN Xingzhong,ZENG Guangming,et al. Study on ultrasound-assisted acid pretreatment of rice straw and its enzymatic hydrolysis[J]. **Journal of Agro-Environment Science**,2009,28(2):375-379.(in Chinese)

[5] LI J,ZHANG X,ZHANG M,et al. Ultrasonic enhance acid hydrolysis selectivity of cellulose with HCl-$FeCl_3$ as catalyst[J]. **Carbohydrate Polymers**,2015,117:917-922.

[6] 韩忠. 不同电场处理对玉米淀粉理化性质影响研究[D]. 广州:华南理工大学,2011.

[7] ZHOU Mei,LU Jun,NIU Lili,et al. Optimized production of the highly moisture-absorbing citrate starch by the utilization of microwave-ass[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2015(7):756-763.(in Chinese)

[8] ZHANG Wenfeng,ZHOU Xiuling. Conditions on preparation of resistant starch from yam by ultrasonic-acid hydrolysis[J]. **Jiangsu Agricultural Sciences**,2015,43(7):281-283.(in Chinese)

[9] ZENG Xinan,CHEN Rujiao,PAN Yongkang,et al. Effect of pulsed electric field on the preparation and properties of cassava starch acetate[J]. **Modern Food Science and Technology**,2015(7):197-204.(in Chinese)

[10] KOKSEL H,BASMAN A,KAHRAMAN K,et al. Effect of acid modification and heat treatments on resistant starch formation and functional properties of corn starch[J]. **International Journal of Food Properties**,2007,10(4):691-702.

[11] PRYOR R W. Inductive conductivity measurement of seawater[C]//proceedings of the 2013 COMSOL conference. Boston. 2013.

[12] JIN Y,YANG N,MA Q,et al. The salt and soluble solid content evaluation of pickled cucumbers based on inductive methodology[J]. **Food and Bioprocess Technology**,2015,8(4):749-757.

[13] YANG N,JIN Y,TIAN Y,et al. An experimental system for extraction of pectin from orange peel waste based on the o-core transformer structure[J]. **Biosystems Engineering**,2016,148:48-54.

[14] HU R,LIN L,LIU T,et al. Reducing sugar content in hemicellulose hydrolysate by DNS method:a revisit [J]. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**,2008,2(2):156-161.

[15] ZUO Yingfeng,GU Jiyou,ZHANG Yanhua,et al. Effect of acidic hydrolysis process on pasting propertiesof corn starch [J]. **New Chemical Materials**,2013(7):96-98.(in Chinese)

[16] 胡秀婷. 淀粉醇酸降解制备糊精及糊精的分级与应用研究[D]. 无锡:江南大学,2014.

会　　议　　消　　息

会议名称:第十四届全国菌根学术研讨会

会议时间:2019-07-26 至 2019-07-29

会议地点:吉林长春

主办单位:中国科学院　东北地理与农业生态研究所

联系人:朱先灿　　电话:13756073145　　Email:myc14@iga.ac.cn

会议规模:200 人以上　　会议主题:菌根研究助推绿水青山建设

会议简介:菌根是植物与真菌形成的和谐共生体,是土壤-真菌-植物系统的生命热区,也是一个多学科交叉的前沿研究热点。为充分展示我国科研工作者在菌根学领域的最新研究进展及成果,加强植物学、土壤学、真菌学和菌根学科研工作者及支持菌根事业的各行业间的交流与合作,促进我国菌根事业的全面发展,探讨新时期菌根研究未来的发展战略,助力绿水青山建设。中国菌物学会菌根及内生真菌专业委员会初步定于 2019 年 7 月 26-29 日在吉林省长春市召开"第十四届全国菌根学术研讨会"。会议将邀请国内外知名院士、专家及学者做大会报告,同时还将组织各类专题讨论和学术交流。