

湿热处理温度对多孔淀粉理化性质的影响

刘庆庆^{1,2}, 陆红佳^{2,3}, 游玉明^{2,3}, 田宝明², 陈朝军², 刘 雄^{2,*}

(1. 铜仁学院生物与农林工程学院, 贵州铜仁 554300;

2. 西南大学食品科学学院, 重庆 400715;

3. 重庆文理学院林学与生命科学学院, 重庆 402160)

摘要:目的:研究湿热处理温度对多孔淀粉理化性质的影响。方法:将湿热处理温度分别控制在110、115和120℃,在水分含量为15%条件下湿热处理1h,研究在该条件下湿热处理对多孔淀粉结构和性质的影响。结果:在水浴温度为85℃条件下多孔淀粉溶解度随湿热处理温度的增加而增加,膨胀度随着湿热处理温度的增加而下降;多孔淀粉吸油率随湿热处理温度的升高而增加;多孔淀粉糊的透光率随湿热处理温度的升高而下降,淀粉糊冻融稳定性、起始糊化温度和热糊稳定性随着湿热处理温度的升高而增强,糊化峰值粘度随湿热处理温度的升高而降低;湿热处理温度对多孔淀粉的结晶结构影响不大,多孔淀粉依然为A型结晶结构,随处理温度的升高其结晶度略有降低;当湿热处理温度为115℃时,其抗性淀粉含量最高,达27.67%。结论:湿热处理温度对多孔淀粉理化性质有明显影响,且随着湿热处理温度的不同存在差异性。

关键词:湿热处理,温度,多孔淀粉

Effect of heat-moisture treatment temperature on physicochemical properties of porous starch

LIU Qing-qing^{1,2}, LU Hong-jia^{2,3}, YOU Yu-ming^{2,3}, TIAN Bao-ming², CHEN Zhao-jun², LIU Xiong^{2,*}

(1. College of Biology and A&F Engineering, Tongren University, Tongren 554300, China;

2. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

3. College of Forestry and Life Science, Chongqing University of Arts and Science, Chongqing 402160, China)

Abstract: Objective: To investigate the effect of heat-moisture treatment temperature on physicochemical properties of porous starch. Methods: the temperature of porous starch was adjusted to 110, 115, 120 °C, then heat-moisture treatment was performed at 15% moisture for 1 h, the effect of the heat-moisture treatment on those porous starch were studied. Results: Under the condition of the water bath temperature of 85 °C porous starch solubility and oil absorption rate of porous starch were increased with the increase of the heat-moisture treatment temperature, degree of swelling was decreased with the increase of treatment temperature, the light transmittance of porous starch paste were decreased with the increasing of treatment temperature, starch paste freeze-thaw stability, initial pasting temperature and heat paste stability were increased as the treatment temperature increasing, and the pasting peak viscosity was decreased with the temperature increasing of treatment. Heat-moisture treatment temperature on the crystalline structure of porous starch was not serious, its crystalline structure was still A type, with the temperature increasing its crystallinity was slightly lower, when the temperature was 115 °C, the content of resistant starch in porous starch was improved to 27.67%. Conclusion: heat-moisture treatment affected the properties of porous starch obviously, and the starch changes were somewhat different due to the different treatment temperature.

Key words: heat-moisture treatment; porous starch; temperature

中图分类号: TS236.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2016)07-0061-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2016.07.004

多孔淀粉是一种新型的变性淀粉,作为一种天然、经济、生物可降解的吸附材料,在食品领域可用

收稿日期: 2015-08-07

作者简介: 刘庆庆(1991-),女,硕士,助教,研究方向:食品微生物与发酵工程, E-mail: liuqingqingay@163.com。

* 通讯作者: 刘雄(1970-),男,博士,教授,研究方向:碳水化合物功能与利用、食品化学与营养, E-mail: liuxiong848@hotmail.com。

基金项目: 梵净山特色动植物资源重点实验室(黔教合 KY 字[2011]005号); 野生动植物保护与利用重点学科建设(黔学位合字 ZDXK[2013]09号); 梵净山特色动植物资源保护与利用创新人才团队(黔教合人才团队字[2012]08号); 重庆市教委科技项目(KJ1401101)。

作吸附香料、甜味剂、调味料、酶、风味物质的理想缓释材料^[1-6]。湿热处理是在低水分含量(<35%),在较高温度(高于糊化温度,通常在100℃以上)对淀粉进行的处理^[7-9]。目前淀粉改性主要以化学改性为主,而淀粉在化学改性的过程中需要加入化学试剂,因此在食品加工应用中,需要对其进行安全性评价。而湿热处理(heat-moisture treatment)在显著改变淀粉理化性质的同时,又具有安全、无污染、易操作等特点,已成为国内外变性淀粉研究的热点之一。

大量研究表明,湿热处理对谷物、薯类和豆类淀粉的结晶结构、淀粉链的相互作用及粘度、抗消化性等性质均有不同程度的影响。湿热处理可以使淀粉的溶解度和膨胀度降低^[10],粘度下降^[11],可以增加抗性淀粉的含量,高群玉等^[12]研究了不同直链淀粉含量的玉米淀粉在湿热处理后,其抗性淀粉含量增加,且直链淀粉含量越高,抗性淀粉增加越多。另外,研究发现湿热处理可以改变淀粉的空间结构,晶型和结晶度,对不同晶型淀粉的微观结构及理化性质影响也不同^[13-14]。

目前湿热处理的研究对象多为天然淀粉,对经过酶解改性的多孔淀粉的结构及吸附抗消化性能还有待于进一步研究。本实验考察不同湿热处理温度对多孔淀粉结构及性质的影响,为物理改性淀粉的开发利用提供基础数据和理论指导,开拓多孔淀粉的应用市场,为多孔淀粉的生理功效性研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

玉米淀粉 市售; α -淀粉酶(≥ 10000 U/g) 杰诺生物酶有限公司;糖化酶(≥ 100000 U/g)、胃蛋白酶(1:3000) 北京奥博星生物技术有限公司;溴化钾(光谱纯) 天津天光光学仪器有限公司;实验中用到的其他试剂或药品均为分析纯。

X'Pert PRO X-射线衍射仪 荷兰 panalytical 分析仪器公司;YX.280B 电热压力蒸汽灭菌器 上海三申医疗器械有限公司;722-P 可见分光光度计 上海现科仪器有限公司;3400N 扫描电子显微镜 日本 HITACHI 公司;Spectrum100 红外光谱仪 美国 Perkin-Elmer 公司。

1.2 多孔淀粉制备及湿热处理

称取100 g玉米淀粉,置于1000 mL的烧杯中,加入pH5.2的复合酶(α -淀粉酶:糖化酶=1:2)醋酸钠缓冲液750 mL,置于50℃水浴中搅拌反应5 h后,用2 mol/L NaOH调节pH至10终止反应,将淀粉洗涤干燥后粉碎,即得多孔淀粉^[15]。

称取一定质量的多孔淀粉,调节水分含量至15%,室温平衡24 h后,装入铝箔袋真空包装,放入高压灭菌锅中,分别在110、115、120℃温度条件下湿热处理1 h后自然冷却,粉碎,过100目筛,即得湿热处理多孔淀粉样品。

1.3 样品的性质测定

1.3.1 溶解度及膨胀度的测定 配制30 mL质量百分比浓度为3%淀粉乳,在一定温度下搅拌加热

30 min后于3000 r/min离心10 min,倒出上清液,称量沉淀物的质量,将上清液在130℃条件下干燥。

$$\text{溶解度}(S) = (A/W) \times 100\%$$

$$\text{膨胀度}(P) = [D/W(1-S)] \times 100\%$$

式中:A为上清液蒸干恒重后的质量/g,W为绝干样品质量/g,D为离心后沉淀物的质量/g,S为溶解度。

1.3.2 吸油率的测定 精确称取2.0 g样品于离心管中,室温下与大豆油混合搅拌30 min后,9000 r/min离心5 min,弃去上清液,沉淀物倾斜45°,静置十分钟,除去大豆油,计算吸油率。

$$\text{吸油率}(\%) = [(m_2 - m_1 - m_0) / m_1] \times 100$$

式中: m_2 为吸附大豆油后淀粉和离心管的重量/g, m_1 为吸附前称取的多孔淀粉质量/g, m_0 为空离心管的质量/g。

1.3.3 透明度和冻融稳定性的测定 取质量分数为1%淀粉乳50 mL置于沸水浴中加热搅拌,保温15 min,并保持原有体积,冷却至室温后,以蒸馏水作参比,620 nm波长下测定糊的透光率,透光率越大其透明度越大。

配制6%淀粉乳,在沸水浴中加热搅拌30 min,冷却至室温,加水保持原有体积,取20 g加入已称量过的离心管中置于-18℃冰箱内放置18 h,取出室温解冻6 h,在4000 r/min离心30 min,取出上清液,称取沉淀物重量,计算析水率。

1.3.4 沉降体积和堆积密度的测定 参考文献[6]的方法,2%的淀粉溶液置于82~85℃水浴中,搅拌保温2 min,冷却至室温后取10 mL糊液于4000 r/min转速离心2 min,量取上清液体积V,计算沉降体积。

$$\text{沉降体积}(\text{mL}) = 10 - V$$

向已知重量(W_0)的比重瓶内加入试样,轻敲比重瓶,不断振动压实,装至瓶口,用平整玻璃板轻轻刮平,称重,重复多次至前后不超过0.01 g,记录准确重量 W_1 ;同一比重瓶内加入蒸馏水为参比,称重 W_2 , $\rho_{\text{水}}$ 为同样测定室温下水的密度。

$$\text{堆积密度} \rho(\text{g/mL}) = (W_1 - W_0) \rho_{\text{水}} / (W_2 - W_0)$$

1.3.5 红外光谱分析 将烘干的1 mg淀粉样品于40 mg KBr研磨压片。用红外光谱分析淀粉的傅里叶变幻红外光谱,扫描的波数范围500~4000 cm^{-1} ,分辨率4 cm^{-1} 。

1.3.6 X射线衍射 称取淀粉样品1.0 g,用无水乙醇洗涤后在50℃干燥5 h,粉碎后取样采用X'Pert PRO X-射线衍射仪进行分析。起始角:5°;终止角:30°;步长:0.02°;扫描速度:5°/min。

1.3.7 布拉班德粘度测定 利用Brabender粘度计测定淀粉的糊化温度:取10 g淀粉,加入105 mL蒸馏水中摇匀,从25℃开始以7.5℃/min的升温速率加热至95℃,在95℃保温15 min,然后以同样的速率降温至50℃,保温5 min。

1.3.8 淀粉颗粒形貌的观察 采用3400 N扫描电子显微镜对淀粉颗粒粉末进行观察,将粉末状淀粉样品干燥后,用导电胶粘在样品座上。把样品座置于离子溅射仪中,在样品表面蒸镀一层10~20 nm厚的铂金膜后,在不同放大倍数下进行电镜观察并拍摄

照片。

1.3.9 抗性淀粉含量的测定 RS 含量的测定参考 Englyst 和 Champ 改良法^[17], 具体步骤如下: 称取样品 1 g, 加入 10 mL 混合酶溶液, 混匀后 37 °C 水浴酶解 16 h; 加入 40 mL 无水乙醇灭酶。静置 30 min 后 3000 r/min 离心 15 min, 弃上清, 沉淀用 80% 乙醇洗涤后置于 100 °C 干燥。用 15 mL 水将沉淀转移至锥形瓶中, 沸水浴中加热 30 min, 冷却至室温后加入 1 倍体积的 4 mol/L KOH 混合 30 min, 用 2 mol/L 乙酸溶液, 调节 pH 为 5.0, 再加入淀粉葡萄糖苷酶溶液 5 mL, 65~70 °C 水浴 90 min。冷却后将水解液转移至 100 mL 容量瓶中, 用乙酸缓冲液定容至刻度, 过滤溶液待测。采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定溶液中还原糖含量, 乘以 0.9 即为抗性淀粉的含量。

1.4 数据分析处理

各组数据均为 3 次重复测定求平均值, 采用 SPSS Statistics 17.0 软件对结果进行统计分析, 采用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 湿热处理温度对多孔玉米淀粉溶解度及膨润度的影响

由图 1a 可知, 淀粉的溶解度随水浴温度升高而增加, 多孔淀粉溶解度随温度的变化较原淀粉大。由于酶解破坏了淀粉分子内部及分子间的氢键, 结晶区和非结晶区也受到一定程度的破坏^[15], 使得水分子更易渗入, 所以多孔淀粉溶解度和膨润度均大于原淀粉。湿热处理温度在 110~120 °C 范围内对多孔淀粉溶解度的影响未呈现规律性, 这与热能和水分的作用、淀粉颗粒大小、淀粉组成等因素相关。由图 1b 可知, 淀粉的膨润度随水浴温度的升高而增大, 多孔淀粉的膨润度较原淀粉大。经湿热处理后多孔淀粉的膨润度下降, 湿热处理后, 淀粉分子质量减小, 淀粉发生降解。在热能和水分的相互作用, 破坏了支链淀粉的 α -1,6 糖苷键, 同时对 α -1,4 糖苷键也产生裂解, 结果产生更多的小分子淀粉, 容易发生链与链之间的交联, 产生有序、致密的结构^[12]。湿热处理温度在 110~120 °C 范围内对多孔淀粉膨润度的影响未呈现出规律性, 有降低的趋势。湿热处理过程中直链淀粉-脂质复合物的形成也会引起溶解度和膨胀度的降低^[18]。

2.2 湿热处理温度对多孔玉米淀粉吸油率的影响

由图 2 可知, 经过湿热处理后, 多孔淀粉对大豆油的吸附能力显著降低 ($p < 0.05$), 随着湿热处理温度的升高, 多孔淀粉对大豆油的吸附性能增强。

2.3 湿热处理温度对多孔玉米淀粉糊透光率和析水率的影响

由图 3 可知, 调节湿热处理温度, 随着温度的升高其透光率显著下降 ($p < 0.05$), 可能是由于湿热处理过程中发生不同程度的美拉德反应, 导致淀粉糊色泽不同程度地加深, 影响其透光率, 这与徐忠等^[18]对玉米淀粉湿热处理研究结果一致。由于水分与热能的相互作用, 破坏了支链淀粉的 α -1,6 键, 同时使 α -1,4 键也发生裂解, 造成结构改变, 引起透光率的改变^[19]。

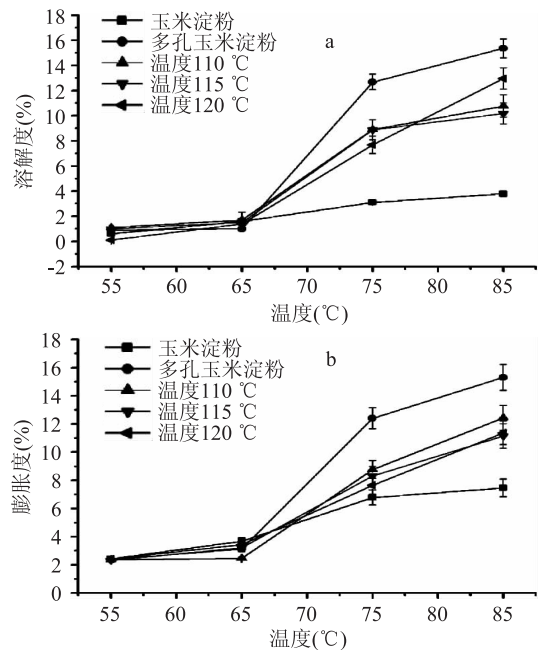


图 1 湿热处理温度对多孔玉米淀粉溶解度和膨润度的影响

Fig.1 The influence of heat-moisture treatment temperature on corn porous starch solubility and swelling degree

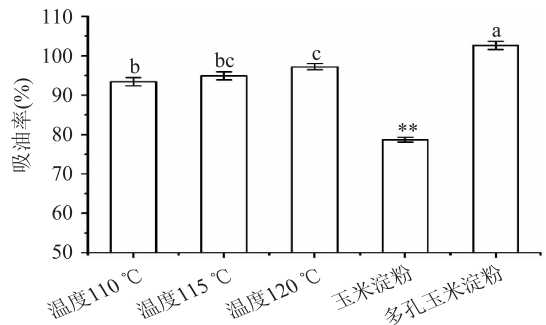


图 2 湿热处理温度对多孔玉米淀粉吸油率的影响

Fig.2 The influence of heat-moisture treatment temperature on corn porous starch oil absorption rate

注: ** 表示玉米淀粉和多孔淀粉间存在极显著性差异 ($p < 0.01$); 不同字母表示湿热处理组及原多孔淀粉间存在显著性差异 ($p < 0.05$), 图 3 同。

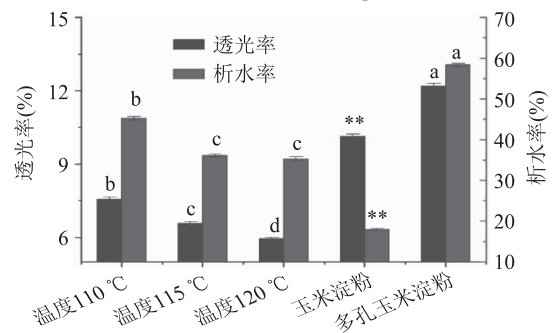


图 3 湿热处理温度对多孔玉米淀粉糊透光率和析水率的影响

Fig.3 The influence of HMT temperature on the transmittance and drainage rate of corn porous starch paste

湿热处理温度对多孔淀粉糊冻融稳定性存在显著性影响, 随着处理温度的升高, 淀粉糊的析水率下

降,析水率越大其冻融稳定性越差,处理温度为115℃和120℃时淀粉糊的冻融稳定性显著高于处理温度为110℃条件下的淀粉糊($p < 0.05$)。

2.4 湿热处理温度对多孔玉米淀粉沉降积和堆积密度的影响

由图4可知,经湿热处理后,多孔淀粉糊稳定性下降,且随着湿热处理温度的增加而下降,呈现出显著性。随着湿热处理温度的增加,多孔淀粉的堆积密度显著增加。

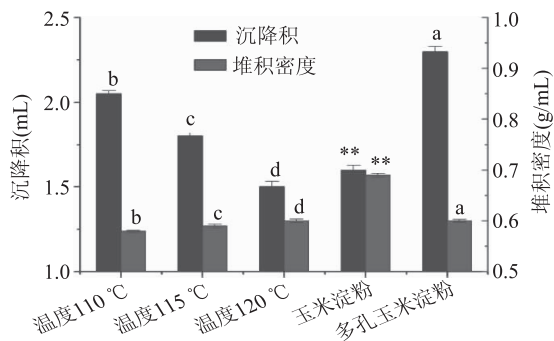


图4 湿热处理温度对多孔玉米淀粉沉降积和堆积密度的影响

Fig.4 The influence of heat-moisture treatment temperature on the sedimentation volume and bulk density of corn porous starch

注:**表示玉米淀粉和多孔淀粉间存在极显著性差异($p < 0.01$),*表示玉米淀粉和多孔淀粉间存在显著差异($p < 0.05$);不同字母表示湿热处理组及原多孔淀粉间存在显著性差异($p < 0.05$)。

2.5 红外光谱

由图5可知,酶解反应后淀粉的特征吸收峰未发生明显的变化。这是因为酶解反应不能导致淀粉分子结构的改变。因此,多孔淀粉的官能团和天然淀粉相似。但是,多孔结构的形成使淀粉颗粒的密度下降,使反应后的特征吸收峰的强度下降。 1047 cm^{-1} 附近的红外吸收是淀粉结晶区的结构特征,对应于淀粉聚集态结构中的有序结构; 1022 cm^{-1} 附近的红外吸收则是淀粉无定形区的结构特征,对应于淀粉大分子的无规则线团结构。淀粉在 1047 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1} 两处的比值R表示淀粉结构中有序结构和无序化结构的比例关系,其比值越大,颗粒内结晶区域越大。由图5可知,调节湿热处理的温度,多孔淀粉的特征吸收峰未发生明显变化,这说明调节湿热处理温度不能导致淀粉分子结构的改变。当湿热处理温度分别为110、115、120℃时,多孔淀粉的R(A1047/A1022)值分别为2.11、1.99、2.00,可见湿热处理后,多孔淀粉颗粒内部结晶区域相对减少。

2.6 X-射线衍射

图6A显示,经过酶解后,淀粉XRD衍射位置无明显变化,都属于“A”型多晶型体,但衍射强度有所增强,说明经过酶解后淀粉的结晶结构类型并未发生变化,而酶解优先发生在非结晶区,结晶度较原淀粉提高。

在不同温度条件下湿热处理多孔淀粉,其XRD

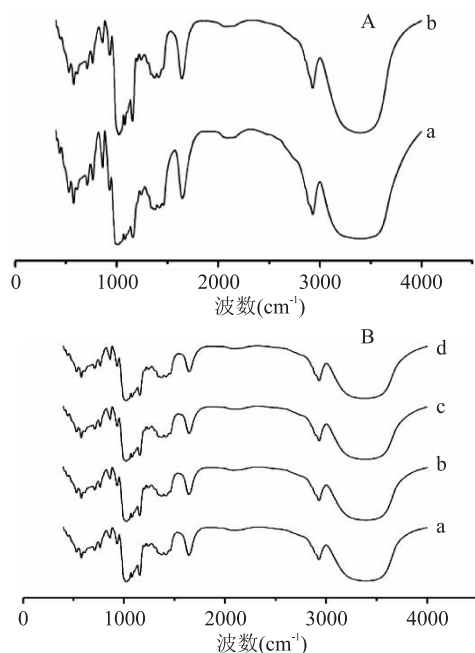


图5 淀粉的红外分析图谱

Fig.5 The infrared spectra of starch

注:A图中a代表玉米淀粉,b代表玉米多孔淀粉。B图中a代表多孔淀粉,b、c、d分别代表110、115、120℃湿热处理后的淀粉。

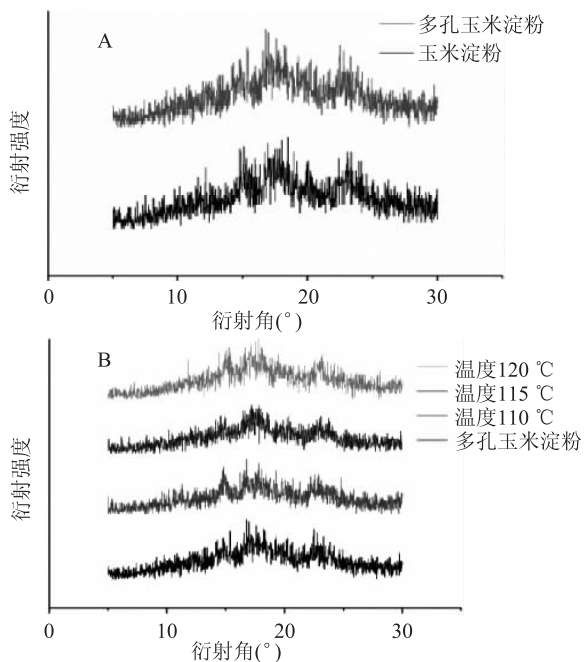


图6 多孔玉米淀粉的X射线衍射图谱

Fig.6 Wide angle X-ray diffraction pattern of corn porous starch

图如图6B所示,图中由下而上依次为多孔玉米淀粉、110、115、120℃湿热处理后的X射线衍射图谱,对比各曲线可知,多孔淀粉经湿热处理后,其XRD图的衍射位置无明显变化,都属于“A”型多晶型物,其衍射强度较原多孔淀粉减弱,相对结晶度降低。这与陈佩^[20]及Lee^[21]等研究湿热处理对相对结晶度影响结果一致。主要原因可能是湿热处理破坏了淀

粉颗粒的结晶区,双螺旋结构变化,同时形成了更多的直连淀粉-脂质复合物^[14]。

2.7 布拉班德粘度

由图7及表1可知,湿热处理后多孔淀粉的起糊糊化粘度略有升高,随着湿热处理温度的升高多孔淀粉的起始糊化温度分别为67.5、67.7、68.7℃,多孔淀粉的糊化温度升高;峰值粘度及(B-A)粘度差值随着湿热处理温度的升高而下降,说明多孔淀粉随着湿热处理温度的增加变得更难糊化了;(B-D)粘度差值随着湿热处理温度的升高而下降,说明多孔淀粉糊的热稳定性随着湿热处理温度的

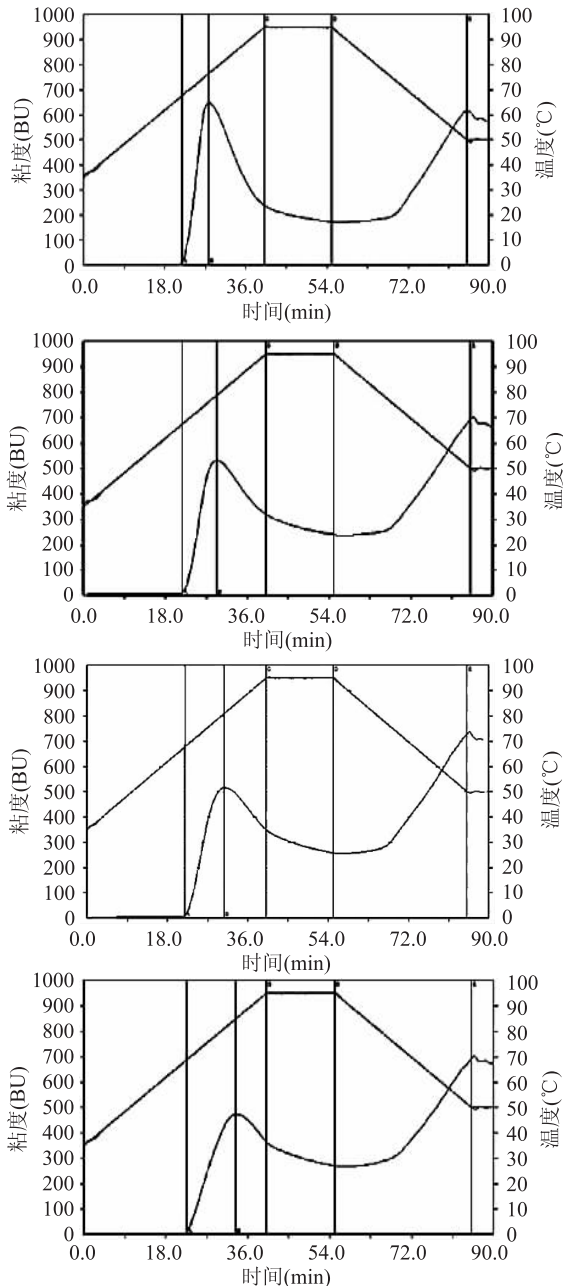


图7 多孔玉米淀粉的布拉班德黏度曲线图

Fig.7 Brabender viscosity curve of corn porous starch

注:图7中a代表多孔玉米淀粉的布拉班德粘度曲线图, b、c、d分别代表多孔淀粉在110、115、120℃温度下湿热处理后的布拉班德粘度曲线图。

增加而增强;(E-D)粘度差值随着湿热处理温度的增加先下降,说明其冷糊稳定性随着处理温度的升高先降低后增强;(B-E)粘度差值为负值,经湿热处理后其凝沉性趋弱,其凝沉性随着湿热处理温度的升高先增强后下降。

2.8 扫描电镜

由图可知,经酶解后形成的多孔淀粉颗粒表面形成很大孔洞,比表面积增加,由此也可推断多孔淀粉具有独特的吸附性能。由图a、b、c可知,110~120℃范围内的高温处理会对多孔淀粉颗粒产生一定的破坏作用,虽然多孔淀粉的多孔结构依然存在,但由于淀粉颗粒表层结构被破坏,对外界的抵抗力下降。

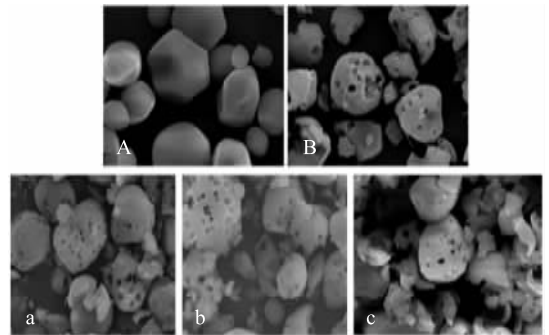


图8 淀粉扫描电镜图

Fig.8 SEM of corn starch

注:图中A、B分别代表玉米淀粉和孔玉米淀粉, a、b、c分别代表湿热处理温度为110、115和120℃的多孔玉米淀粉。

2.9 湿热处理温度对多孔淀粉抗性淀粉含量的影响

酶解后多孔淀粉的抗性淀粉含量较原玉米淀粉升高。湿热处理对多孔淀粉抗性淀粉含量的影响在110~120℃范围内未呈现出正相关性,湿热处理温度为115℃时形成的抗性淀粉含量较多,湿热处理时间过短不利于直链淀粉分子接近,但温度过高也会导致淀粉分子过度降解,使产生的淀粉聚合度太小,不利于抗性淀粉的形成^[22]。湿热处理温度过低或过高都不利于抗性淀粉的生成。

3 结论

固定湿热处理水分含量为15%、处理时间为1h,改变湿热处理温度,经实验发现,湿热处理温度对多孔淀粉理化性质有影响。随着湿热处理温度的升高多孔淀粉在水浴温度为55~85℃范围内的溶解度和膨润度的变化无明显规律性,水浴温度为85℃条件下多孔淀粉溶解度随湿热处理温度的增加而增加,膨润度随着湿热处理温度的增加而下降;多孔淀粉吸油率、多孔淀粉糊的透光率随湿热处理温度的升高而下降,冻融稳定性、淀粉糊的起始糊化温度和热糊稳定性随着湿热处理温度的升高而增强,糊化峰值粘度随湿热处理温度的升高而降低;湿热处理温度对多孔淀粉的结晶结构影响不大,多孔淀粉依然为A型结晶结构,随处理温度的升高其结晶度略有降低;当湿热处理温度为115℃时,其抗性淀粉含量最高,达27.67%。

表1 玉米多孔淀粉布拉班德粘度仪测定参数值

Table 1 The value of determination parameters of corn porous starch by Brabender viscometer

评价点	A	B	C	D	E	F	BA	BD	ED	BE	
多孔	时间(min)	0:21:50	0:27:48	0:40:00	0:55:00	1:25:00	1:30:00				
	粘度(BU)	10	651	239	172	616	571	641	479	444	35
	温度(℃)	67.9	76.7	94.9	95	50.2	50.1				
温度 110 ℃	时间(min)	0:21:44	0:29:12	0:40:00	0:55:00	1:25:00	1:30:00				
	粘度(BU)	14	531	320	240	692	664	517	291	452	-161
	温度(℃)	67.5	78.7	94.8	95.1	50.3	50.1				
温度 115 ℃	时间(min)	0:21:52	0:30:38	0:40:00	0:55:00	1:25:00	1:30:00				
	粘度(BU)	11	517	351	259	728	697	506	259	469	-211
	温度(℃)	67.7	80.7	94.8	95	50.2	50				
温度 120 ℃	时间(min)	0:22:32	0:33:22	0:40:00	0:55:00	1:25:00	1:30:00				
	粘度(BU)	11	474	365	270	691	672	463	204	421	-117
	温度(℃)	68.7	84.8	94.9	95.1	50.2	49.9				

表2 抗性淀粉含量

Table 2 The content of resistant starch

品种	抗性淀粉含量(%)	
玉米淀粉	23.25 ± 1.5 ^A	
多孔玉米淀粉	25.70 ± 0.88 ^{AB}	
湿热处理多孔 玉米淀粉	温度 110 ℃	23.89 ± 1.51 ^A
	温度 115 ℃	27.67 ± 1.74 ^B
	温度 120 ℃	23.67 ± 1.19 ^A

注:表中 A 和 B 表示各组间抗性淀粉含量存在显著性差异($p < 0.05$),相同字母表示各组间无显著性差异($p > 0.05$)。

参考文献

- [1] Basciano H, Federicol L. Fructose, insulin resistance and metabolic dyslipidemia[J]. Nutrition Metab, 2005, 2(1): 1-14.
- [2] Maria A. The reduction of dietary sucrose improves dyslipidemia, adiposity and insulin secretion in an insulin resistant rat model[J]. Nutrition, 2007, 23: 489-497.
- [3] Chang PR, Yu J, Ma X. Preparation of porous starch and its use as a structure-directing agent for production of porous zinc oxide[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(2): 1016-1019.
- [4] Luo Z, Fu X. Immobilization of urease on dialdehyde porous starch[J]. Starch-Stärke, 2010, 62(12): 652-657.
- [5] Nagata K, Okamoto H, Danjo K. Naproxen particle design using porous starch[J]. Drug development and industrial. Pharmacy, 2001, 27(4): 287-296.
- [6] Yoshimaru T, Shibata M, Fukugomori T, et al. Preparation and characteristics of rumen-bypass microcapsules for improvement of productivity in ruminants[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 1999, 47(2): 554-557.
- [7] Collado LS, Corke H. Heat-moisture treatment effects on sweetpotatostarches differing in amylose content[J]. Food Chemistry, 1999, 65(3): 339-346.
- [8] Gunaratne A, Hoover R. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 49(4): 425-437.
- [9] Anderson AK, Guraya HS. Effects of microwave heat-moisture treatment on properties of waxy and non-waxy rice starches[J]. Food Chemistry, 2006, 97(2): 318-323.
- [10] Olayinkaa OO, Adebowale KO, Olu-Owolabib BI. Effect of

heat-moisture treatment on physicochemical properties of white sorghum starch[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(2): 225-230.

[11] Adebowale KO, Lawal OS. Effect of annealing and heat-moisture conditioning on the physicochemical characteristics of Bambarra groundnut (Voandzeia subterranean) starch[J]. Food, 2002, 46(5): 311-316.

[12] 高群玉, 武俊超, 李素玲. 湿热处理对不同直链含量的玉米淀粉性质的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(9): 1-6.

[13] Wittawat J, Chureerat P, Vilai R, et al. Microstructural and physicochemical properties of heat-moisture treated waxy and normal starches[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(2): 246-258.

[14] Varatharajan V, Hoover R, Liu Q, et al. The impact of heat-moisture treatment on the molecular structure and physicochemical properties of normal and waxy potato starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 81(2): 466-475.

[15] Zhang B, Cui D, Liu M, et al. Corn porous starch: Preparation, characterization and adsorption property[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2012, 50(1): 250-256.

[16] 徐忠, 缪铭, 王鹏, 等. 湿热处理对不同淀粉颗粒结构及性质的影响[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2005, 21(5): 649-653

[17] 石劭, 徐贵发. 抗性淀粉测定方法的研究进展[J]. 卫生研究, 2005, 34(4): 504-507.

[18] Wang S J, Gao W Y, Jia W. Crystallography, morphology and thermal properties of starches from four different medicinal plants of Fritillaria[J]. Food Chemistry, 2006, 96: 591-596.

[19] 谢碧霞, 钟秋平, 李安平, 等. 湿热处理对橡胶淀粉特性影响的研究. 食品科学[J]. 2007, 28(3): 104-106.

[20] 陈佩, 张晓, 赵冰, 等. 湿热处理对糯小麦淀粉理化性质的影响[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(2): 85-89.

[21] Lee CJ, Kim Y, Choi SJ, et al. Slowly digestible starch from heat-moisture treated waxy potato starch: Preparation, structural characteristics, and glucose response in mice[J]. Food Chemistry, 2012, 133(4): 1222-1229.

[22] 高嘉安. 淀粉与淀粉制品工艺学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.