酶法联合压热–冷却循环处理制备抗性淀粉

吴亨，尹秀华，谢丽燕，肖满凤，林莹

（广西大学轻工与食品工程学院，广西南宁 530004）

摘要：本研究以玉米淀粉为原料，通过酶法联合压热-冷却循环处理制备抗性淀粉，测定酶解过程中淀粉的水解度（DE 值）、脱支度和直链淀粉含量、样品抗性淀粉含量及其热稳定性，采用差示扫描量热仪（DSC）、扫描电子显微镜（SEM）分别测定抗性淀粉的热力学特性和颗粒形貌。结果表明，耐高温 α-淀粉酶酶解能显著提高淀粉的水解度，耐高温 α-淀粉酶联合压热-冷却循环制备的抗性淀粉含量为 10.51%~12.16%；淀粉脱支度、抗性淀粉含量、直链淀粉含量随着普鲁兰酶酶解前压热-冷却循环处理次数增加而显著下降，抗性淀粉的热稳定性却得到提高；先普鲁兰酶酶解后压热-冷却循环处理 3 次得到的抗性淀粉含量最高，达到 17.94%；抗性淀粉的糊化峰值温度为 119.5 ℃~121.1 ℃，糊化焓随抗性淀粉含量的增大而增大，颗粒形状为不规则的碎石型。

关键词：抗性淀粉；耐高温 α-淀粉酶；普鲁兰酶；压热-冷却循环

文章篇号：1673-9078(2014)5-245-250

Enzymatic Hydrolysis Coupled with Autoclaving-cooling Cycles for the Preparation of Resistant Starch

WU Heng, YIN Xiu-hua, XIE Li-yan, XIAO Man-feng, LIN Ying

(College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Maize starch was used as raw material to prepare resistant starch by enzyme method coupled with autoclaving–cooling cycles. Hydrolysis and debranching degree of starch, amylose content, resistant starch content and thermodynamic stability were detected in the experiment. The thermodynamic characteristics, particle morphology of resistant starch were analyzed by differential scanning calorimeter (DSC) and scanning electron microscope (SEM), respectively. The results showed that the hydrolysis degree of starch was increased significantly after enzymolysis of thermostable α-amylase. Resistant starch content of coupled thermostable α-amylase with autoclaving-cooling cycles was 10.51% to 12.16%. Debranching degrees, resistant starch and amylose content were declined significantly with autoclaving-cooling cycles increasing before digestion of pullulanase, but thermal stability of the resistant starch was increased. The resistant starch content reached the highest value (17.94%) after digestion of pullulanase before three times processing of autoclaving-cooling cycles. Gelatinization peak temperature of resistant starch was from 119.5 ℃ to 121.1 ℃. The gelatinization enthalpy was increased with resistant starch content increasing, and the granule shape of resistant starch was of irregular gravel type.

Key words: resistant starch; thermostable α-amylase; pullulanase; autoclaving-cooling cycle

抗性淀粉是改性淀粉中的一种，实际是指抗小肠内淀粉酶作用的淀粉。1996 年欧洲抗消化淀粉协会将其定义为不被健康人体小肠所吸收淀粉及其降解物的总称，具体分为 4 类：物理包埋淀粉颗粒（RS1）、抗性淀粉颗粒（RS2）、回生淀粉（RS3）和化学改性淀粉（RS4），其中 RS3 是在加热冷却等加工过程中因淀粉的结构发生变化由可消化的淀粉转化而成，实质上是老化淀粉，是目前研究得最广泛的抗性淀粉[1~2]。由于抗性淀粉的生理功效与于膳食纤维类似，此外抗性淀粉还具有调节血糖、降低胆固醇、控制体重[3~4]，维持正常肠道 pH、预防结肠癌[5]，促进可溶性矿物质离子的吸收[6]，具有十分广阔的应用前景。

目前，抗性淀粉的制备方法是基于显著影响抗性淀粉形成的两个因素（直链淀粉与支链淀粉的比列、淀粉链的聚合度）考虑，不少研究报道指出高直链淀粉含量有利于抗性淀粉的形成，淀粉分子聚合度在 50~100 范围内的链易于形成抗性淀粉[7]。现主要的制备方法有热处理法、脱支法、挤压法、微波和超声波处理法等[8]，然而这些单一的处理方法存在原料利用率低、抗性淀粉得率不高的缺点，难以在实际生产中应用。耐高温 α -淀粉酶可以迅速有效地降低淀粉链长度，普鲁兰酶作用于支链淀粉中的 α -1, 6 糖苷键，增

收稿日期：2013-12-26

基金项目：广西壮族自治区自然科学资金（2013GXNSFAA019085）

作者简介：吴亨（1988-），男，硕士研究生，研究方向：食品科学

通讯作者：林莹(1971-)，女，博士，教授，研究方向：食品生物技术

加直链淀粉含量，多次的压热-冷却循环处理可提高杂乱无章的淀粉分子链重新聚集成有序晶体的机率，因此酶解和压热-冷却循环处理的联合，使得抗性淀粉的含量提高成为了可能。本研究通过尝试耐高温α-淀粉酶、普鲁兰酶联合压热-冷却循环处理制备抗性淀粉，与玉米原淀粉、单一酶法、压热法、压热-冷却循环法比较，采用现代仪器分析手段，测定制备过程中淀粉的水解度、脱支度、直链淀粉的含量和抗性淀粉的热特性、颗粒形貌，从理论层面上解析抗性淀粉的形成，从而为指导我国抗性淀粉的生产以及抗性淀粉的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

食用玉米淀粉，河南郑州弘益泰化工股份有限公司；氢氧化钠、氯化钾、氢氧化钾、盐酸、无水乙醇、无水磷酸氢二钠、无水磷酸二氢钾、苯酚、葡萄糖、碘酸钾、碘、叠氮钠等均为分析纯，3, 5-二硝基水杨酸为化学纯；普鲁兰酶（1200 U/mL），江苏锐阳生物科技有限公司；耐高温α-淀粉酶（300 U/mL）、淀粉葡萄糖苷酶（10 U/mL）、葡萄糖氧化酶（50 U/mg），广西泰诺生物药剂有限责任公司；辣根过氧化物酶（250 U/mg），sigma 公司；直链淀粉、直链淀粉标品（来源于玉米淀粉），史瑞可生物（上海）有限公司。

1.2 实验设备

DSC200PC 型差示扫描量热仪，德国 NETZSCH 公司；SU-8020/X-MAX/80 场发射扫描电子显微镜，日立高新技术公司；其他小型设备有 DKZ-2 电热恒温振荡水浴锅、JRA-6 磁力搅拌水浴锅、YX280A 高压灭菌锅、PHSJ-3F 雷磁 pH 计、722 型可见分光光度计、TD6 台式低速自动平衡离心机等。

1.3 实验方法

1.3.1 抗性淀粉样品的制备

耐高温 α-淀粉酶联合压热-冷却循环处理制备抗性淀粉的流程如图 1 所示：25%淀粉乳在 85 ℃水浴条件下糊化 30 min，后按图 1 所示从左到右的四条途径制备抗性淀粉。途径一：先耐高温α-淀粉酶酶解（耐高温α-淀粉酶添加量为 30 U/g 淀粉，85 ℃条件下水浴酶解 15 min，用 1 mol/L 的盐酸调节 pH 至 3.0 后 100 ℃灭酶 10 min，用 1 mol/L 的氢氧化钠调 pH 至 7.0），后压热-冷却循环（在高压灭菌锅内 121 ℃条件下处理 20 min，自然冷却至室温，4 ℃冷藏 24 h）处理 3 次；途径二：先压热-冷却循环处理 1 次，后耐高温α-淀粉酶酶解，再压热-冷却循环处理 2 次；途径三：先压热-冷却循环处理 2 次，后耐高温α-淀粉酶酶解，再压热-冷却循环处理 1 次；途径四：先压热-冷却循环处理 3 次，再耐高温 α-淀粉酶酶解。（上述途径一、二、三、四制备的抗性淀粉分别编号 α-0、α-1、α-2、α-3）

普鲁兰酶联合压热冷却-循环处理制备抗性淀粉：用普鲁兰酶酶解（普鲁兰酶添加量为 8 U/g 淀粉，在 pH 4.0~4.5 条件下，55 ℃水浴酶解 16 h，用 1 mol/L 的氢氧化钠调节 pH 至 7.0 后 100 ℃灭酶 10 min）代替耐高温α-淀粉酶，再按图 1 所示流程制备抗性淀粉。（此时，途径一、二、三、四制备的抗性淀粉分别编号 P-0、P-1、P-2、P-3）

同时，与玉米原淀粉（编号 CK），单一耐高温 α-淀粉酶法（编号 α）、单一普鲁兰酶法（编号 P）、单一压热-冷却循环法（压热-冷却循环 1 次记为 YL1，压热-冷却循环 3 次记为 YL3）制备的抗性淀粉进行比较分析。

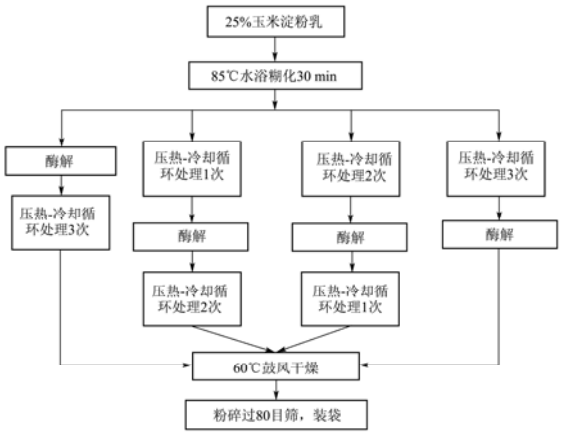


图 1 酶解联合压热-冷却循环处理制备抗性淀粉的流程

Fig.1 Scheme of coupled enzymatic on the preparation of resistant starch with autoclaving-cooling cycles

1.3.2 淀粉水解度、脱支度测定

淀粉的水解度是衡量淀粉被耐高温α-淀粉酶水解程度大小的指标，通常用 DE 值来表示，DE 值的测定参照刘婷 2012[9]的方法测定。

淀粉脱支度是衡量淀粉经普鲁兰脱支酶酶解作用，淀粉被脱支程度大小的指标。称取经普鲁兰酶酶解的淀粉样品 0.2 g（精确至 0.1 mg），加入 2 滴无水乙醇湿润，加入 5 mL 1 mol/L 的 NaOH 溶液，沸水浴溶解，定容至 100 mL，测定溶液中麦芽糖的含量。

溶液中麦芽糖含量的测定采用 3, 5-二硝基水杨

酸比色法测定。脱支度的计算公式：

$$T_n = \frac{m_n - m_0}{m_\infty - m_0} \times 100\%$$

注：T_n-脱支 n 小时的脱支度，%；m_n-脱支 n 小时产生的麦芽糖的量，mg；m_0-脱支 0 小时产生的麦芽糖的量，mg；m_∞-脱支 36 小时产生的麦芽糖的量，此时麦芽糖趋于平衡，mg。

1.3.3 直链淀粉含量测定

直链淀粉含量的测定参照古碧（2009）[10]的方法测定。

1.3.4 抗性淀粉含量及其热稳定性测定

抗性淀粉含量的测定参照刘婷[9]的方法测定，主要过程是先用耐高温 α -淀粉酶和淀粉葡萄糖苷酶酶解消去淀粉样品中的可消化淀粉，5000 r/min 离心 15 min 去上清液，后用 2 mL 4 mol/L 氢氧化钾溶液充分溶解沉淀，再加入淀粉葡萄糖苷酶彻底酶解完全，5000 r/min 离心 15 min 取上清液稀释至 100 mL，取 1 mL 稀释液和 3 mL 的酚酶试剂（由 1 mg/mL 的苯酚试剂和含有 12 U/mL 辣根过氧化物酶、12 U/mL 葡萄糖氧化酶、1 mg/mL 叠氮钠、0.1 mg/mL 4-氨基安替比林的 pH 为 7 的磷酸盐缓冲液等体积混合而成）显色，在 520 nm 波长下测定其吸光度，与标准葡萄糖曲线对照。

抗性淀粉热稳定性的测定：准确称量 0.1 g（精确至 0.1 mg）的淀粉样品，加入 2.5 ml 去离子水，震荡均匀，沸水浴 20 min，后按照抗性淀粉含量测定的步骤相同，其热稳定性计算公式：

$$\text{抗性淀粉的热稳定性}\ (\%) = \frac{R_1}{R_0} \times 100\%$$

其中，R_0，抗性淀粉含量，mg；R_1，沸水浴 20 min 后抗性淀粉含量，mg。

1.3.5 抗性淀粉热力学特性分析

准确称取 5 mg 淀粉样品，加入去离子水调配成 25%的淀粉乳溶液，放在专门的压模器下压盖，在室温下平衡 1 h，放进差示扫描量热仪中测定，同时放进一个空白铝制干锅做参比，在-25 ℃~160 ℃范围内进行扫描，升温速率 10 K/min，降温速率 5 K/min，得到淀粉的 DSC 曲线。

1.3.6 抗性淀粉的颗粒形貌测定

用电子扫描显微镜专用的双面胶固定过 80 目筛的少量淀粉样品于扫描载物圆盘上，进行喷金处理，利用电子扫描显微镜观察淀粉样品颗粒的微观形貌。

1.3.7 数据统计分析

实验数据采用 Excel2010、SPSS17.0 分析处理，采用 Origin8.0 生成图像，所有实验组均一式三份平行测定。

2 结果与讨论

2.1 水解度、脱支度与抗性淀粉含量的关系

2.1.1 水解度对抗性淀粉含量的影响

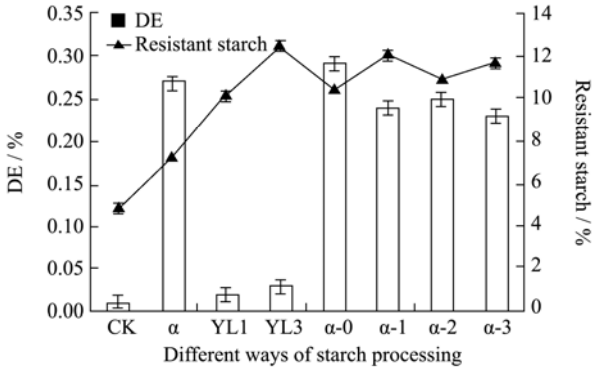


图 2 水解度对抗性淀粉含量的影响

Fig.2 Effects of hydrolysis degree on resistant starch content

如图 2 所示，耐高温 α -淀粉酶酶解淀粉能显著增加淀粉的 DE 值，单一的压热处理以及压热-冷却循环处理对淀粉 DE 值增加不显著（P>0.05）。仅对淀粉进行耐高温 α-淀粉酶酶解，淀粉的 DE 值与酶解联合压热-冷却循环处理的淀粉 DE 值没有显著性的差异，但先对淀粉进行酶解处理再进行压热-冷却循环处理的淀粉 DE 值总体上要比先压热-冷却处理再酶解的淀粉 DE 值高，这是因为淀粉经过压热-冷却循环处理后，淀粉在冷藏回生的过程中形成了一定的抗性，不利于耐高温 α-淀粉酶的酶解作用。耐高温 α-淀粉酶联合压热-冷却循环处理制备抗性淀粉，淀粉 DE 值和抗性淀粉含量随酶解前压热-冷却循环处理次数不同变化不大，分别在 0.23%~0.29%和 10.51%~12.16%之间。

2.1.2 脱支度对抗性淀粉含量的影响

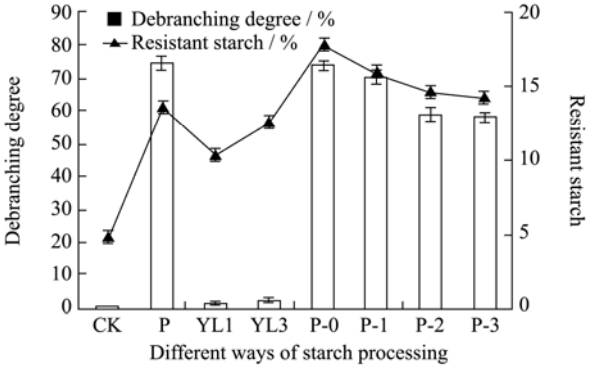


图 3 脱支度对抗性淀粉含量的影响

Fig.3 Effects of debranching degree on resistant starch content

如图 3 所示，普鲁兰酶对玉米淀粉脱支效果明显，仅对淀粉进行压热以及压热-冷却循环处理，其脱支效果不明显。高脱支度的淀粉其抗性淀粉含量相对较高，从普鲁兰酶酶解联合压热-冷却循环制备抗性淀粉的

四个处理方式看，随酶解前压热-冷却循环处理次数的增加其脱支度降低，其抗性淀粉含量下降，这是由于压热-冷却处理后，淀粉产生了抗性，不利于普鲁兰酶的酶解作用，从而导致其脱支度低，直链淀粉含量相对不高。单一普鲁兰酶脱支处理制备抗性淀粉，其脱支度最高（74.36%），但其抗性淀粉含量反而比酶联合压热-冷却循环处理的抗性淀粉含量要低，这有可能是因为其没经压热-冷却循环处理，压热-冷却循环处理能提高杂乱无章的淀粉链分子重新聚集排成有序晶体结构的几率[8]。因此，普鲁兰酶联合压热-冷却循环处理通过提高淀粉的脱支度和分子链重新排列成有序晶体结构的几率，能有效提高抗性淀粉的得率。

2.2 酶解联合压热-冷却循环处理对直链淀粉含量的影响

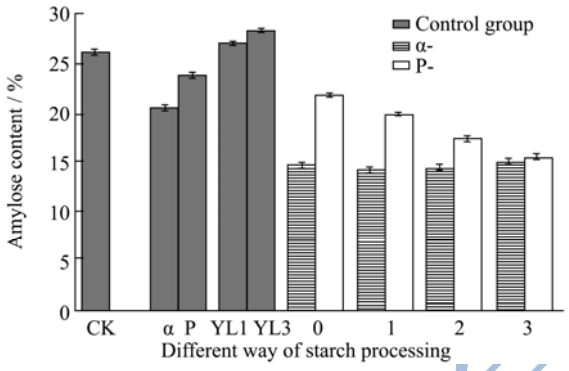


图 4 酶解联合压热-冷却循环处理对直链淀粉含量的影响

Fig.4 Effects of coupled with autoclaving-cooling cycles on amylose content

如图 4 所示，耐高温 α-淀粉酶添加量为 30 U/g 淀粉，在 85 ℃条件下水浴酶解 15 min，普鲁兰酶添加量为 8 U/g 淀粉，在 pH 4.0~4.5、55 ℃水浴酶解 16 h，直链淀粉的含量均下降。不管是单一酶法，还是酶联合压热-冷却循环处理淀粉，普鲁兰酶处理的直链淀粉含量要高于耐高温 α-淀粉酶酶解的淀粉。这是由于耐高温 α-淀粉酶作用于淀粉的 α-1, 4 糖苷键，会在一定程度上增加体系的还原糖含量；普鲁兰酶作用于 α-1, 6 糖苷键，产物是麦芽三糖和短链直链分子，一方面增加了还原糖含量，另一方面增加了直链淀粉含量。还原糖的存在会影响碘与淀粉的颜色反应，随着还原糖含量的增高，碘与淀粉颜色呈蓝色、紫色、红色、无色的变化趋势[11]。压热法和压热-冷却循环处理分别使得直链淀粉含量小幅度上升了 1.03%和 2.36%，这有可能是由于高温高压处理，能打断淀粉分子间的一部分糖苷键，生成的是短链线性分子而不是还原糖。

2.3 酶解联合压热-冷却循环处理对抗性淀粉含量的影响

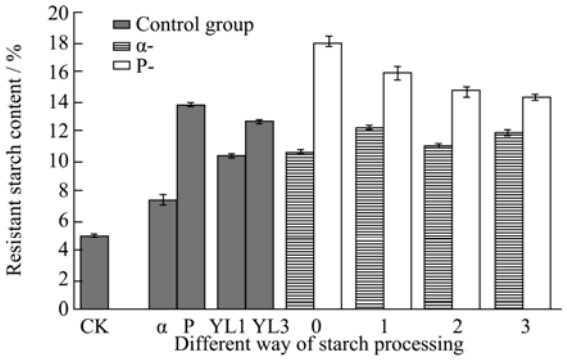


图 5 酶解联合压热-冷却循环处理对抗性淀粉含量的影响

Fig.5 Effects of coupled with autoclaving-cooling cycles on resistant starch content

酶解联合压热-冷却循环处理对抗性淀粉含量的影响如图 5 所示。总体上酶解联合压热-冷却循环处理比单一酶法、压热法、压热-冷却循环法得到的抗性淀粉含量更高，单一普鲁兰酶制备抗性淀粉其含量比单一耐高温 α-淀粉酶的要高。对于普鲁兰酶联合压热-冷却循环制备抗性淀粉的方案中，先酶解后压热-冷却循环处理三次得到的抗性淀粉含量最高，达到 17.94%。耐高温 α-淀粉酶联合压热-冷却循环制备的抗性淀粉含量在 10.51%~12.16%范围内，相差不大。普鲁兰酶联合压热-冷却循环制备得到的抗性淀粉含量明显高于耐高温 α-淀粉酶联合压热-冷却循环制备的抗性淀粉。赵淮新[12]利用高直链玉米淀粉制备抗性淀粉，结果也表明普鲁兰酶联合压热冷却循环的处理可明显有效地提高抗性淀粉的含量。

2.4 酶解联合压热-冷却循环处理对抗性淀粉热稳定性的影响

抗性淀粉的热稳定性如图 6 所示，单一法和酶解联合压热-冷却循环处理制备的抗性淀粉热稳性定在 84.59%~99.87%之间，远远高于玉米原淀粉中天然抗性淀粉的热稳定性（68.79%），单一法制备的抗性淀粉热稳定性差异性不显著。普鲁兰酶联合压热-冷却循环处理制备的抗性淀粉热稳定性随酶解前压热-冷却循环次数的增加而提高，先压热-冷却循环处理 2 次后耐高温 α -淀粉酶酶解制备的抗性淀粉热稳定性最高，达到 99.87%。低热稳定性的抗性淀粉在蒸煮等热处理手段中，大部分转化成可消化淀粉[13]，大大降低了抗

性淀粉的生理活性功效，不利于工业化应用。

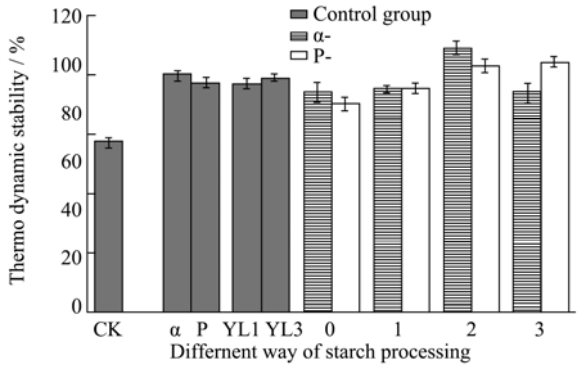


图 6 酶解联合压热-冷却循环处理对抗性淀粉热稳定性的影响

Fig.6 Effects of coupled with autoclaving–cooling cycles on thermodynamic stability

2.5 抗性淀粉的热力学特性

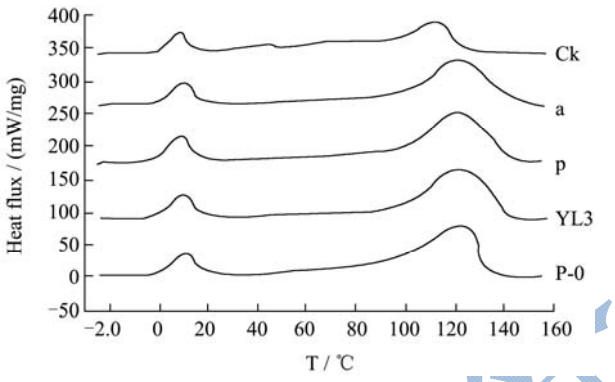


图 7 抗性淀粉的 DSC 曲线

Fig.7 DSC curve of resistant starch

表 1 抗性淀粉的热特性图谱解析

Table 1 Thermal characteristics analysis of resistant starch

抗性淀粉制备方法	RS/%	淀粉糊化峰	
		峰值温度/℃	ΔH/(J/g)
CK	4.87±0.11	112.8±0.46	4.37±0.13
α	7.37±0.11	122.1±1.02	8.83±0.53
P	13.69±0.18	120.9±0.66	9.53±0.62
YL3	12.56±0.13	119.5±0.85	10.26±0.30
P-0	17.94±0.32	121.1±0.96	12.26±0.61

图 7 和表 1 中的 P-0 指先进行普鲁兰酶酶解后压热-冷却循环处理制备的抗性淀粉。图 7 中每条 DSC 曲线的第一个峰代表水和淀粉乳的结晶共融峰，第二个峰指抗性淀粉糊化峰。从表 1 可知，玉米原淀粉的糊化峰值温度为 112.8 ℃，抗性淀粉样品的峰值温度在 119.5 ℃~121.1 ℃范围。高抗性淀粉含量的糊化峰峰值温度高，随着抗性淀粉含量增大，淀粉样品的融化焓增大，这是由于玉米原淀粉颗粒内的直链淀粉在酶或压热等的处理下溶出，在回生冷却的过程中发生相互靠近，定向排列形成了结构更为紧密牢固的晶体[14]。

2.6 抗性淀粉的颗粒形貌

图 8 中 a、b、c 分别为玉米原淀粉、先压热-冷却处理 1 次后耐高温 α -淀粉酶酶解制备的抗性淀粉、先普鲁兰酶酶解后连续 3 次压热-冷却循环处理制备的抗性淀粉的电镜扫描图。玉米原淀粉颗粒是圆形饼状或鹅卵石般有规则的形状，而抗性淀粉则是不规则的碎石形。抗性淀粉颗粒的不规则形状实质是由于抗性淀粉在制备的过程中，淀粉原颗粒随着温度的升高吸水膨胀被破坏，直链淀粉溶出并在老化回生的过程中逐渐结晶，形成不规则的凝胶状[15]，凝胶烘干脱水，经过高速粉碎机粉碎，就形成了如碎石般的不规则状。

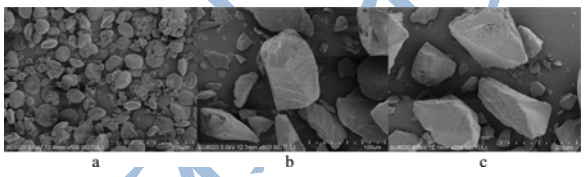


图 8 玉米淀粉和抗性淀粉的颗粒形貌

Fig.8 Particle morphology of corn starch and resistant starch

3 结论

在酶解联合压热-冷却循环处理制备抗性淀粉的工艺中，耐高温 α -淀粉酶酶解前压热-冷却循环处理次数影响淀粉的 DE 值和抗性淀粉含量不大；淀粉脱支度、抗性淀粉含量、直链淀粉含量随着普鲁兰酶酶解前压热-冷却循环处理次数增加而显著下降，而抗性淀粉的热稳定性却有所提高。普鲁兰酶添加量 8 U/g 淀粉，在 55 ℃条件下酶解 16 h，后经压热-冷却循环处理 3 次，得到的抗性淀粉含量最高 17.94%，分别比单一的普鲁兰酶法、压热-冷却循环法制备的抗性淀粉含量高出 4.25%和 5.38%，因此，先普鲁兰酶酶解后连续压热-冷却循环处理 3 次制备抗性淀粉产率较高，具有一定的实际应用价值。抗性淀粉样品的糊化峰值温度在 119.5 ℃~121.1 ℃，糊化焓随着抗性淀粉含量的增大而增大，抗性淀粉颗粒形状为不规则的碎石型。

参考文献

[1] 赵凯.淀粉非化学改性技术 [M].北京:化学工业出版社,2008

[2] Wen Q B, LorenzK J, Matin, D J, et a1. Carbohydrate digestibility and resistant starch of steamed bread [J]. Starch, 1996, 48(5): 180-185

[3] 王竹,杨月欣,周瑞华,等.抗性淀粉的代谢及对血糖的调节作用 [J].营养学报,2003,25(2):190-194
WANG Zhu, YANG Yue-xin, ZHOU Rui-hua, et al. Metabolism of resistant starch and its regulative effect on plasma

glucose [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2003, 25(2): 190-194

[4] Martinez-Flores H E, ChengY K, Martinez-Bustos F, Sgarbieriv. Effect of high fiber produces on blood lipids and lipoproteins in hamters [J]. Nutrition Research, 2004, 24: 85-93

[5] 徐贵发,石励,李慧,等.抗性淀粉与大肠癌关系的病例对照研究[J].营养学报,2006,28(1):11-14
XU Gui-fa, SHI Mai, LI Hui, et al. Case-control study on the association between resistant starch intake and colorectal cancer [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2006, 28 (1): 11-14

[6] Schulz A G M, VanAmelsvoort J M M, Beynen A C. Dietary native resistant starch but not retrograded resistant starch raises magnesium and calcium absorption in rats [J]. American Institute of Nutrition, 1993, 4: 1724-1731

[7] 衣杰荣,姚惠源.淀粉分子结构对形成抗性淀粉的影响[J].粮食与饲料工业,2001,6:389-394
YIN Jie-Rong, YAO Hui-Yuan. Influence of molecular structure of starch on formation of resistant starch [J]. Cereal and Feed Industry, 2001, 6: 389-394

[8] Ann-Charlotte E.编.赵凯,等译.食品淀粉的结构、功能及应用[M].北京:中国轻工业出版社, 2009

[9] 刘婷,林莹,古碧,等.木薯抗性淀粉的酶法制备研究[J].食品工业,2012,33(12):18-21
Liu Ting, Lin Ying, Gu Bi, et al. Resistant starch of cassava preparation by enzymatic hydrolysis [J]. The Food Industry, 2012, 33(12): 18-21

[10] 古碧,李开棉,李兆贵,等.不同木薯品种（系）块根淀粉特性研究[J].热带作物学报,2009,12:1876-1882
Gu Bi, Li Kai-Mian, Li Zhao-Gui, et al. Starch properties of cassava root [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2009, 12: 1876-1882

[11] 江培翊,陆红,何正平,等.淀粉与碘的颜色反应与还原糖含量的关系[J].实验室研究与探索,2005,24(3):31-32
JIANG Pei-hong, LU Hong, HE Zheng-ping, et al. On the relationship between color reaction of starch with I2 and content of reducing sugar [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2005, 24(3): 31-32

[12] ZHAO Xin-huai, LIN Yang. The impact of coupled acid or pullulanase debranching on the formation of resistant starch from maize starch with autoclaving–cooling cycles [J]. European Food Research and Technology, 2009, 230: 179-184

[13] Yuree Wandee, Chureerat Puttanlek, Vilai Rungsardthong, et al. Effects of gelatinization and gel storage conditions on the formation of canna resistant starch [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(7): 2665-2673

[14] 武俊超.豌豆抗性淀粉的制备及其性质研究[D].广州:华南理工大学,2012
WU Jun-chao. Study on Preparation and properties of pea resistant starches [D]. Guangzhou: South China Univer sity of Technology, 2012

[15] 庞雪娟,刘丽斌,黄继红,等.压热法结合反复冻融制备小麦抗性淀粉及其理化性质研究[J].现代食品科技,2013,29(3):519-522
TANG Xue-juan, LIU Li-bin, Huang Ji-hong, et al. Physicochemical properties of wheat resistant starch by autoclave method combined with repeated freezing and melting [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(3): 519-522