

文章编号:1673-1689(2008)03-0021-07

甘薯淀粉热力学特性及其回生机理探讨

谭洪卓^{1,3}, 谭斌¹, 高虹^{2,3}, 檀亦兵³, 谷文英³

(1. 国家粮食局 科学研究院, 北京 100037; 2. 湖北农业科学研究院 农产品加工与核农技术研究
所, 湖北 武汉 430064; 3. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 采用差示扫描量热仪对甘薯淀粉在不同水分、糊化终止温度、降温速率和保持温度下的回生过程进行了研究, 发现在水分质量分数 70% 时, 糊化终止温度为 90℃ 以上, 渗漏的直链淀粉分子不仅相互聚集形成较大的有序结晶区域, 还与体系中的脂质分子结合形成复合物, 在后期冷却过程中形成螺旋结晶, 回生程度达到最大。甘薯淀粉糊在 0~−4℃ 储藏时, 冰晶的形成过程将阻碍支链淀粉外链的相互并拢和直链淀粉分子链的重排; 4℃ 左右, 结晶生长速度虽较慢, 但最终回生程度最大; 慢速降温冷却也有利于增大回生程度。

关键词: 甘薯淀粉; 糊化; 回生; 水分; 温度; 降温速率

中图分类号: TS 235.2

文献标识码: A

Study on the Thermal Properties and Retrogradation Mechanism of Sweet Potato Starch

TAN Hong-zhuo^{1,3}, TAN Bin¹, GAO Hong^{2,3}, TAN Yi-bing³, GU Wen-ying³

(1. Academy of State Administration of Grain, Beijing 100037, China; 2. Institute for Farm Products Processing and Nuclear-Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Science, Wuhan 430064, China; 3. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The retrogradation of sweet potato starch under different moisture contents, final temperatures for gelatinization, cooling rates and holding temperatures were investigated using Differential Scanning Calorimetry. The result illuminated that under such conditions as 70% of moisture content and above 90℃, amylose in sweet potato starch leached out of starch granules, then congregated to form a larger ordered crystalline area, and formed amylose-lipid complexes, which form helices when cooling. The ice-crystal baffled the congregation of exterior chains in amylopectin and the re-arranging of amylose when sweet potato starch paste was stored under the range of 0℃~−4℃. The rate of crystal growth was slow and the degree of retrogradation was largest when storage temperature ascended to about 4℃. The retrogradation was increased by a slower cooling rate.

Key words: sweet potato starch; gelatinization; retrogradation; moisture; temperature; cooling rate

收稿日期: 2007-08-26.

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2006BAD02B01).

作者简介: 谭洪卓(1976-), 女, 湖南长沙人, 工学博士, 助理研究员, 主要从事粮食、油脂与植物蛋白工程研究.

甘薯粉丝生产中有几个重要的工序就是利用甘薯淀粉的糊化与回生特性来达到成品要求,即将含有一定水分的生粉丝加热熟化,通过冷却回生,冷冻降黏,形成粉丝内部坚实的结构。淀粉糊化是当淀粉颗粒在有水存在的情况下加热而导致颗粒内部的分子秩序破坏的一个过程^[1]。回生是一个糊化的淀粉分子开始重组而形成更有秩序结构的过程,糊化实际上是回生的一个前提条件。

在甘薯淀粉的糊化和回生过程中,最敏感的影响因素是水分和温度。淀粉中的半晶体在 DSC 曲线上表现出的晶体融化崩溃等现象,其实质是在自由水分子的作用下氢键大量断裂,半晶解体过程。水分影响糊化后淀粉分子链的迁移,决定淀粉分子链重新聚合的速率^[2]。加工过程中湿甘薯粉丝的水分,通常都在 65%~75%之间,属于较易回生范围的边缘。如何控制制品的水分,既使制品得到充分的糊化,又尽量使回生达到一个合适程度是十分有意义的。温度对甘薯淀粉的回生有着十分显著的影响,包括加热的热历史、冷却时间、冷却速率和储藏的环境温度等,这些因素不仅影响支链淀粉的重结晶,而且对直链淀粉结晶的形成也有较大影响^[3-6]。由于粉丝最后形成坚实的凝胶结构需要靠回生过程来实现,即粉丝糊化后需要较低温度下存放一段时间,让其中的糊化淀粉充分回生。这个过程采用的温度和时间在本研究中称为保持温度(holding temperature)和保持时间(holding time)。因此有必要详细探讨水分、糊化终止温度、降温速率、保持温度和保持时间对甘薯淀粉结晶形成的影响。作者通过对水分和温度与甘薯淀粉回生关系的系统研究,揭示其对直链淀粉分子有序、支链淀粉重排结晶、直链-脂类复合物和直链淀粉结晶的影响规律,探讨其回生机理,为甘薯淀粉制品加工和储藏提供一定的理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料与仪器

甘薯淀粉(徐薯 18 号):南京农业科学研究所提供;差示扫描量热仪(DSC):DSC-7 型,美国 PE 公司产品;电子天平:R200D 型,德国 Sartorius 公司产品;可调温冰箱:BD-100LT 型,青岛海尔特种电冰柜有限公司产品;扫描电镜仪:QUANTA-200 型,荷兰 FEI 仪器公司产品。

1.2 实验方法

1.2.1 不同水分甘薯淀粉的糊化与回生 采用差示扫描量热仪(DSC)测定不同水分甘薯淀粉的糊化

和回生,用 DSC 铝盒称取 2.0 mg 的干甘薯淀粉,按水分质量分数 40%、50%、60%、70%、80%和 90%,用微量注射器分别加入不同量的去离子水,密封压盖后室温下放置 24 h 平衡,用 DSC 测定糊化,糊化后的样品在 4 ℃下储藏 24 h 后用 DSC 测定回生过程。糊化扫描范围为 20~100 ℃,回生后再进行温度扫描,范围为 20~130 ℃,升温速率都为 10 ℃/min。各条件重复测定 3 次。

1.2.2 加热糊化最终温度对甘薯淀粉回生的影响

用 DSC 样品铝盒称取 2.0 mg 的样品一批,按样品水质量比为 1:2 的比例加入去离子水,密封后隔夜放置平衡。用 DSC 将样品糊化,扫描温度依次从 20~120 ℃,然后程序降温到 10 ℃,扫描速率均为 10 ℃/min。糊化后的样品在 4 ℃下储藏 24 h 后重新进行温度扫描(20~130 ℃,10 ℃/min)。各条件重复测定 3 次。

1.2.3 降温速率对甘薯淀粉回生的影响 按 1.2.1 方法,同时在 DSC 上制备一批糊化后的甘薯淀粉糊样品,分别以不同降温速率(2、5、10、20 ℃/min)降至 4 ℃,储藏 24 h 后进行温度扫描(20~130 ℃,10 ℃/min)。各条件重复测定 3 次。

1.2.4 保持温度对甘薯淀粉回生的影响 糊化后的样品在-18、-10、-4、0、4、25 ℃下储藏 24 h 后用 DSC 测定回生。糊化样品的制备和回生的测定同 1.2.1。同时进行另外两个实验:(1)将 25 ℃,4 ℃冷藏和-4 ℃、-18 ℃下冷冻的甘薯淀粉凝胶取出,用薄刀片横切成片,用扫描电镜观察其内部组织状态。(2)用 DSC 铝盒称取 8.00 mg 在 4 ℃下冷藏了 24 h 的甘薯淀粉凝胶样品,密封压盖后,用 DSC 测定其玻璃化转变温度(T_g),测定程序:以 10 ℃/min 的速率从 40 ℃降温扫描到-30 ℃,在-30 ℃下保持 10 min,再以 3 ℃/min 的速率从-30 ℃升温扫描到 40 ℃。各条件重复测定 3 次。

2 结果与讨论

2.1 水分质量分数对甘薯淀粉糊化和回生的影响

2.1.1 水分质量分数对甘薯淀粉糊化的影响 不同水分质量分数下甘薯淀粉糊化过程的 DSC 扫描见图 1。6 种不同梯度水分质量分数的甘薯淀粉糊化时,晶体融化的起始温度(T_o)基本相同(66~67 ℃)。在质量分数 40%和 50%时,糊化焓很小,且终止温度(T_e)低,意味着糊化过程很快就结束。这是因为最小的水分质量分数需达到 35%才能使淀粉开始糊化^[7],40%~50%的水分质量分数和仅仅能使甘薯淀粉糊化一小部分,其他大部分仍为生淀粉

颗粒,在水分不足的情况下,生淀粉颗粒的熔融,裂解需要 200℃左右的高温^[8]。

随着水分质量分数的升高,当达到 70%时,晶体融化的顶峰温度和终止温度突然升高至最高值(80.0℃和 86.9℃),热焓值也达到最大(14.5 J/g)。随着水分质量分数进一步增加到 80%~90%时,顶峰温度、终止温度和热焓值也逐渐降低。说明水分质量分数 70%时,体系中所有的淀粉都能充分糊化,晶体与水发生水合溶胀,大量氢键断裂,结晶融化崩溃,所需糊化的能量和温度要求都达到最高值。在水分质量分数 80%~90%的情况下,由于水的过量存在,氢键更容易断裂,导致淀粉颗粒特别容易糊化,表现出较小的热焓峰。Igura 等人^[9]发现在甘薯淀粉糊化所需的水分质量分数充足的前提下,随着水分质量分数的再进一步增加时,糊化峰温度降低,糊化峰面积减小。

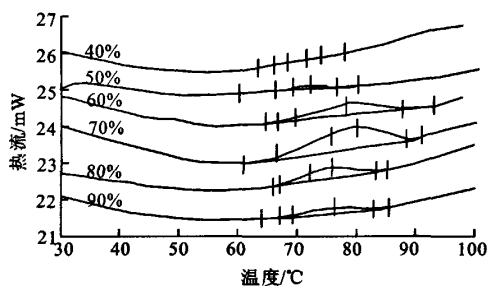


图1 不同水分质量分数下甘薯淀粉糊化的 DSC 曲线
Fig.1 DSC curves of gelatinized sweet potato starch at different moisture contents

2.1.2 水分质量分数对甘薯淀粉回生的影响 不同水分质量分数下甘薯淀粉糊经历 4℃储藏 24 h 后的回生情况见图 2。从图中可以看出:对于所有在 4℃储藏 24 h 后的甘薯淀粉糊的相转变温度都比其原始淀粉的相转变温度低大约 12~22℃,这与 Yuan 等人^[1]的研究结果基本一致。在 4℃储藏时,糊化的淀粉分子重组,但仍然没有天然淀粉颗粒那样有秩序和稳定,这种不稳定的结构融化温度就比原始淀粉的融化温度要低^[1]。第一个峰为支链淀粉结晶的熔融峰,因为一般认为糊化淀粉回生后的 DSC 热焓峰在 30~90℃范围都是支链淀粉重结晶的熔融范围^[10-12]。

水分质量分数为 70%的回生后甘薯淀粉凝胶的 T_o 、 T_p 、 T_c 分别为 55.5℃、68.9℃、76.2℃,重结晶程度最高($\Delta H = 3.6$ J/g),即回生程度最大。水分质量分数 70%以上,随着水分质量分数的升高,融化峰的 T_o 、 T_p 和 T_c 逐步降低,即回生程度逐

步降低;水分质量分数为 90%时,重结晶的融化热焓降至 0.4 J/g;水分质量分数低于 70%时,融化峰温度也逐步降低,重结晶热焓呈下降趋势;水分质量分数为 40%时,重结晶热焓为 0.9 J/g。这是因为:水分质量分数 70%以下时,其支链淀粉分子的迁移速度降低,参与重结晶的水分子减少,因而重结晶程度降低,尤其是在 40%~50%水分质量分数的淀粉糊,只有部分糊化,这种现象更明显。水分质量分数 70%以上时,淀粉分子的迁移速度增加,但由于其浓度降低,淀粉分子之间的交联机会降低,因而回生程度逐步降低。Longton 和 Legrys^[12]也报道在 4℃时,淀粉在水分质量分数低于 10%或高于 80%,不回生。

水分质量分数也影响甘薯直链淀粉-脂质复合物的解体温度。水分质量分数为 40%~50%时,没有检测到直链淀粉-脂质复合物熔融峰。水分质量分数 60%~80%时,该熔融峰出现,解体温度为 106~107℃,热焓值以 70%的最高。水分质量分数达到 90%时,没有检测到该峰。这些现象可以解释为:淀粉水分质量分数过低,直链淀粉分子并未完全从淀粉颗粒中渗漏出来,糊化是不完全的,即使渗漏出来的直链淀粉分子链也会因体系水分质量分数过低而不能充分舒展而呈卷曲状态,无法与体系中的脂质分子结合,导致直链淀粉-脂质复合物没有形成;水分质量分数增加时,大量直链淀粉分子从淀粉颗粒中渗漏出来,充分舒展,迁移性提高,与体系中的脂质分子以反平行的方式排列^[13],形成螺旋结构的复合物,在后期冷却过程中形成结晶;水分质量分数过高,淀粉浓度太低,淀粉分子与脂肪的交联机会降低,也很难形成直链淀粉-脂质复合物,这能部分解释“浓度太低的淀粉糊液不容易回生”的原因。另外直链淀粉-脂质复合物解体温度越高,其结构也越稳定^[14-15]。

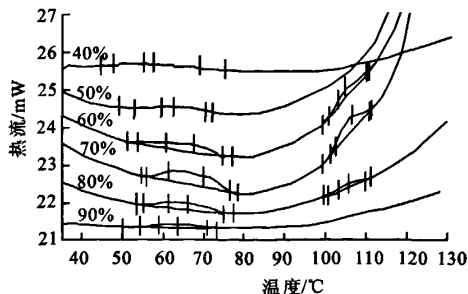


图2 不同水分质量分数甘薯淀粉糊的回生 DSC 曲线
Fig.2 DSC curves of retrograded sweet potato starch paste at different moisture contents

2.2 糊化终止温度对甘薯淀粉回生的影响

不同糊化终止温度下甘薯淀粉糊经历 4 ℃ 储藏 24 h 后的回生情况见图 3。从图中可以看出,糊化终止温度为 60 ℃ 和 70 ℃ 的甘薯淀粉糊只表现一个大熔融峰。这是因为甘薯淀粉的糊化温度一般为 63.0 ℃-80.0 ℃-87 ℃ (T_0 - T_p - T_c),而在 60 ℃~80 ℃ 下终止淀粉糊化过程,即淀粉没有充分糊化就被冷藏回生,体系的重结晶不完全,其熔融峰与原始淀粉的糊化峰相似。糊化终止温度为 80 ℃ 甘薯淀粉糊多出现一个微弱的支链淀粉结晶融化峰。

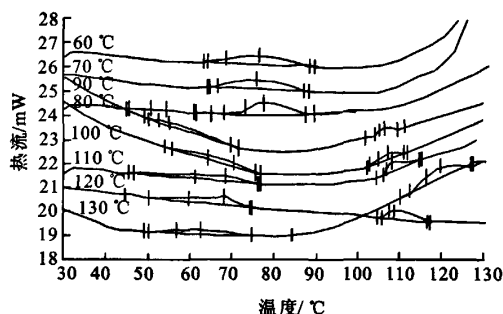


图 3 甘薯淀粉在不同加热终止温度后 4 ℃ 下储藏 24 h 后的回生情况

Fig. 3 Retrogradation of sweet potato starch at different gelatinized temperatures (4 ℃, 24 h)

在 60 ℃、70 ℃ 和 80 ℃ 终止加热糊化,直链淀粉-脂肪复合物没有充分形成,没有出现直链淀粉-脂肪复合物特征峰;直到甘薯淀粉经历了完全的糊化(90 ℃ 以上),该峰才明显出现,即糊化终止温度为 90~120 ℃ 的甘薯淀粉都表现出两个峰。第一个峰仍为支链淀粉结晶的宽熔融峰,熔融热焓和温度远远低于原始淀粉的糊化热焓和温度。Cooke、Gidley^[16] 和 Yuan 等人^[1] 解释回生后的支链淀粉再糊化,峰宽的原因是有大而不完整的结晶形成,因此起始温度比原始淀粉低。第二个峰为重结晶的直链淀粉-脂肪复合物的熔融峰。它们有相近的 T_0 和 T_p ,分别为 103~105 ℃ 和 107~109 ℃,而 T_c 则随着温度的增加而增加。淀粉只有充分糊化过后,才有更多的新的直链淀粉-脂肪复合物形成,结晶区在规模上比天然淀粉有所增加,用 X-射线衍射仪能直接检测到直链淀粉-脂肪复合物的典型特征峰(V-型模式)^[17]; Tufvesson 等人^[18] 也发现淀粉样品经过一个较高温度的 DSC 热流扫描后,能获得更多的直链淀粉-脂肪的复合物。

当加热结束的糊化温度为 130 ℃ 时,仍然出现两个峰, T_0 - T_p - T_c 分别为 50.0-63.1-73.9 ℃ 和

112.9-120.1-123.2 ℃。第一个峰仍为支链淀粉晶体熔融峰。第二个吸热峰是直链淀粉晶体的融化峰。加热结束的糊化温度越高,冷却过程中形成的直链淀粉结晶越多,因为高温使得淀粉分子的无序分布增加,所具能量增加,分子的迁移性增强,使直链淀粉相互并拢的可能性明显增大,形成直链富集区,导致在后期回生阶段直链分子之间构成双螺旋堆积成结晶。同时,由于支链淀粉的无序程度增加,其外侧链的结晶增长也受到影响,因此支链淀粉回生程度降低,导致 DSC 图上第一个峰(支链淀粉熔融峰)很微弱,热焓值降至 2.5 J/g。直链淀粉自身的富集大大减少了直链淀粉与脂质接触的机会,因而直链淀粉-脂肪复合结晶物的熔融峰变弱甚至消失(本实验条件下没有检测出)。120 ℃ 之前没有出现直链淀粉结晶熔融峰,其原因是加热温度不足以使直链淀粉产生更大的迁移性和伸展性,链间形成双螺旋较少,因而不能形成或形成极少(超出仪器检测范围)的直链淀粉结晶。

由此可以得出:在甘薯淀粉凝胶里,有 3 种类型的分子在相互作用产生结晶:一种仅仅是支链淀粉结晶,一是直链淀粉和脂肪的复合结晶物,还有一种是纯直链淀粉结晶。

2.3 降温速率对甘薯淀粉回生的影响

甘薯淀粉糊在不同降温速率下的回生情况见图 4。从图中看出,降温速度越慢,形成凝胶后再次熔融的支链淀粉峰和直链淀粉-脂肪熔融峰温度都略有升高,热焓值增大,说明回生程度增大。这与丁文平^[2] 用流变仪测试不同降温速率下形成的大米淀粉凝胶强度时得出的结果类似。他认为,降温速率过快,淀粉分子(尤其是直链淀粉分子)来不及取位和定向,分子间通过氢键交联缠绕较少,导致凝胶强度较低,即回生程度不高,熔融温度低,所需热焓低。而以慢速冷却,直链淀粉分子充分交联缠绕,形成的三维凝胶网络结构比较完善,体系回生程度高。因此,慢速降温冷却有利于甘薯粉丝的回生。

2.4 不同保持温度对甘薯淀粉回生的影响

甘薯淀粉糊在不同保持温度下储藏 24 h 后的回生情况见图 5。从支链淀粉的熔融峰来看,以 4 ℃ 储藏后 T_0 - T_p - T_c 最高,热焓值也最大,说明甘薯淀粉糊在该温度下回生最快,回生程度最大。0 ℃ 时 ΔH 最小,说明在该温度下形成的支链淀粉结晶最少。-18 ℃ 时 T_0 - T_p - T_c 最低,说明在该温度下形成的支链淀粉结晶最不稳固,在较低的温度下就会熔融。Ribotta 等人^[19] 也发现在 -18 ℃ 下支链

淀粉凝胶的 T_g 低于未冻藏的(在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下老化的),在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下比在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,支链淀粉凝胶有一个更高的熔融温度范围。

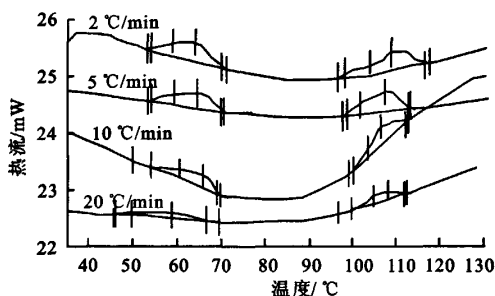


图4 甘薯淀粉糊在不同降温速率下的回生情况

Fig. 4 Retrogradation of sweet potato starch paste at different cooling rate

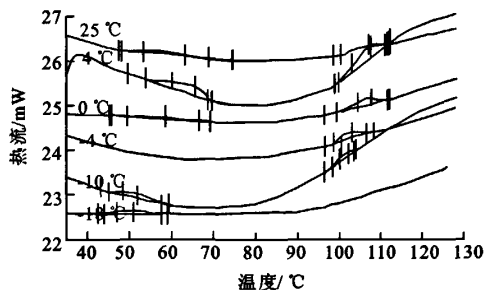


图5 甘薯淀粉糊在不同温度下保持 24 h 后的回生情况

Fig. 5 Retrogradation of sweet potato starch at different holding temperatures (24 h)

从直链淀粉-脂肪复合结晶物的熔融峰来看,也以 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 储藏后 T_g 、 T_p 、 T_c 最高,热焐值也最大。 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 储藏能形成正常的甘薯淀粉直链淀粉-脂肪复合结晶物的熔融峰,只是形成量最少, ΔH 最低。保持温度在 $4\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,随着温度的降低,直链淀粉-脂肪复合结晶物的熔融峰温度稍有降低, ΔH 值也逐渐降低,直至到 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,该峰消失。原因是保持温度远低于 T_g ($-5.24\text{ }^{\circ}\text{C}$, 见图 6),体系处于玻璃态,很少有机会给淀粉分子链提供移动性,分子链被冻结,直链淀粉分子与脂肪链之间很难形成结晶。Ribotta 等人^[19]将淀粉凝胶 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏后,再进行 DSC 温度扫描,也没有检测到直链淀粉与脂肪复合结晶物的融化峰。甘薯淀粉凝胶融化峰的大小受回生期间可利用水的影响很大。在冻藏期间,体系的总水分将重新分布,冰晶的重结晶将发生,而且将导致少量更大尺寸的结晶的形成。这两个过程(水的混乱和冰的重结晶)将诱导直链淀粉和支链淀粉的结构和重排的改变,这些改变在

淀粉回生过程中得到体现:在冻藏阶段,甘薯直链淀粉与脂肪复合结晶物的 ΔH 随着储藏温度的降低而降低。

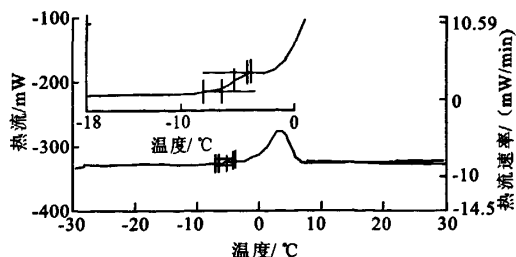


图6 水分质量分数为 70% 的甘薯淀粉凝胶体系的玻璃化转变温度

Fig. 6 Glass transition temperatures of sweet potato starch gel with 70% of moisture content

淀粉回生是一个非平衡的热可逆的重结晶过程,它由 3 个连续的阶段组成:成核、生长和成熟^[20]。成核和生长是发生在液相中,这要求甘薯淀粉分子中的各组分分子链定向移动,因此这 3 个阶段都发生在体系的玻璃化温度 T_g 和晶体融化温度 T_m 之间^[8]。保持温度低于 T_g ,体系处于玻璃态,分子链被冻结,淀粉分子之间很难形成结晶;保持温度高于 T_m ,分子链运动强烈,结晶态不能保持而熔融。图 6 为水分质量分数为 70% 的甘薯淀粉凝胶体系的玻璃化转变温度。从图中得知,对于水分质量分数为 70% 的甘薯淀粉凝胶体系而言, T_g 为 $-5.24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而 T_m 则为甘薯淀粉体系糊化的起始温度($68\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右)。在 T_g 和 T_m 之间,甘薯淀粉糊体系处于热力学非平衡的高弹态,分子之间可以通过氢键相互吸引重新排列形成结晶,使体系的自由焓降低,逐步达到平衡态^[2,20]。

不同温度下甘薯淀粉凝胶的电镜扫描图见图 7。从图中可以看出,甘薯淀粉凝胶在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冻藏,其内部组织结构损伤最大,出现大而粗糙的孔洞;在 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冻藏,其内部组织结构也受到损伤,出现大的孔洞,但比 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的结构要光滑。 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷藏下组织最细密紧凑;而 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下因为回生不够,凝胶组织紧密度次之。这是因为在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻时,甘薯淀粉凝胶体系中的水不断结为冰晶,而水由液态转变成固态后,体积增加,所以整个体系膨胀而产生应力^[21]。当凝胶外层首先冻结,内部继续结晶膨胀时,就会产生很大的应力挤压外层甚至破裂。另外冻结冻藏中水分不断从淀粉凝胶表面升华出去,内部的水分却不能向表面补充,造成凝胶表面呈多孔性,出现这种干耗(冻伤)现象。

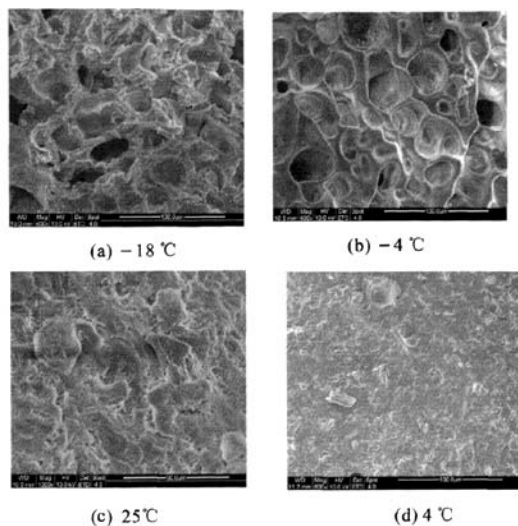


图7 不同温度下甘薯淀粉凝胶的电镜扫描图(600×)
Fig. 7 Scanning electron micrographs (600×) of sweet potato starch gel at different temperatures

结合淀粉凝胶体系的玻璃化转变温度和电镜扫描结果,可以将这些现象解释为:保持温度越接近 T_g ,晶体成核速度越快,生长速度越慢;而储藏温度越接近 T_m ,晶体成核速度越慢,生长速度越快^[20,22]。理论上应该是保持温度在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_g)左右甘薯淀粉糊的晶体成核速度越快,而实验结果却是 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下晶体的成核速率较快,生长速度较慢,表现出来的综合重结晶程度最大,凝胶组织最细密紧凑(见图7),这与粉丝生产中的实际情况是一致的。原因是在冷冻时甘薯淀粉糊的结晶属于非均匀(异

相)成核,这种成核所要求的过冷度比均匀成核要小得多,只要温度比 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 稍低几度就能形成冰晶核。在 $0\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 储藏时,靠近最大冰晶生成带($-1\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[21],冰晶的形成过程将阻碍支链淀粉外链的相互并拢和直链淀粉的重排,导致支链淀粉的熔融峰非常微弱甚至仪器没有检测到。当保持温度跨越这一温度段,上升到 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,成核就很快,最终回生程度也越大,说明甘薯淀粉的支链淀粉重结晶是典型的晶核限制型,这与丁文平^[3]研究的大米淀粉重结晶的规律基本一致,因为大米淀粉和甘薯淀粉都属于支链淀粉含量较高的两类淀粉。

3 结 语

1) 甘薯淀粉在水分质量分数为70%时,大量直链淀粉分子渗漏,分子链舒展,迁移性提高,聚集形成有序结晶区域,同时与体系中的脂质分子结合形成复合物,在后期冷却中形成螺旋结晶,回生程度达到最大。

2) 甘薯淀粉在糊化终了温度为 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,甘薯直链淀粉-脂肪的复合物熔融峰出现;糊化终了温度为 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,出现直链淀粉结晶熔融峰。

3) 甘薯淀粉糊在 $0\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 储藏时,冰晶的形成过程将阻碍支链淀粉外链的相互并拢和直链淀粉的重排。当保持温度跨越这一温度段,上升到 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,结晶生长速度虽较慢,最终回生程度最大。慢速降温冷却也有利于增大回生程度。 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 T_o - T_p - T_c 最低,结晶最不稳定,凝胶体系出现冻害。

参考文献(References):

- [1] Yuan R C, Thompson D B, Boyer C D. Fine structure of amylopectin in relation to gelatinization and retrogradation behavior of maize starches from three wx-containing genotypes in two inbred lines[J]. *Cereal Chemistry*, 1993, 70(1): 81-89.
- [2] 丁文平. 大米淀粉回生及鲜湿米线生产的研究[D]. 无锡:江南大学, 2002.
- [3] Liu Q, Doubies B Thompson. Retrogradation of du wx and su2 wx maize starches after different gelatinization heat treatments[J]. *Cereal Chemistry*, 1998, 75(6): 868-874.
- [4] Boltz K W, Thompson D B. Initial heating temperature and native lipid affects ordering of amylose during cooling of high-amylose starches [J]. *Cereal Chemistry*, 1999, 76: 204-212.
- [5] Galvez F C, Resurreccion A V, Ware G O. Process variables, gelatinized starch and moisture effects on physical properties of mungbean noodles [J]. *Journal of Food Science*, 1994, 59(2): 378-386.
- [6] Galvez F C, Resurreccion A V, Ware G O. Formulation and process optimization of mungbean noodles[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1995, 19: 191-205.
- [7] Njintang Y N, Mbofung C M. Kinetics of starch gelatinization and mass transfer during cooking of taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) slices [J]. *Starch/Stärke*, 2003, 55: 170-176.
- [8] Parker R, Ring S G. Aspects of the physical chemistry of starch [J]. *Journal of Cereal Science*, 2001, 34: 1-13.
- [9] Igura N, Hayakawa I, Fujio Y. Effect of water state on thermal properties of sweet potato starch [J]. *Oyo Toshitsu Ka-*

- gaku, 1997, 44(3): 329—332.
- [10] Silverio J, Fredriksson H, Andersson R, et al. The effect of temperature cycling on the amylopectin retrogradation of starches with different amylopectin unit-chain length distribution [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2000, 42: 175—184.
- [11] Levine H, Slade L. Dough Rheology and Baked Product Texture[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [12] Longton J, Legrys G A. Differential scanning calorimetry studies on the crystallinity of ageing wheat starch gels [J]. *Starch/Stärke*, 1981, 33: 410—415.
- [13] Morrison W R, Tester R F, Snape C E, et al. Swelling and gelatinization of cereal starches. IV. Some effects of lipid-complexed amylose and free amylose in waxy and normal barley starches [J]. *Cereal Chemistry*, 1993, 70(4): 385—391.
- [14] Holm J, Björck I, Ostrowska S, et al. Digestibility of amylose-lipid complexes in-vitro and in-vivo[J]. *Starch/Stärke*, 1983, 35: 294—300.
- [15] Adamu B O A. Resistant starch derived from extruded corn starch and guar gum as affected by acid and surfactants: structural characterization[J]. *Starch/Stärke*, 2001, 53: 582—591.
- [16] Cooke D, Gidley M J. Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinization: origin of the enthalpic transition[J]. *Carbohydrate Research*, 1992, 227: 103—112.
- [17] Eliasson A-C. Starch in food: Structure, function and applications[M]. Boca Raton, Boston, New York, Washington, DC: CRC Press, 2004.
- [18] Tufvesson F, Wahlgren M, Eliasson A-C. Formation of amylose-lipid complexes and effects of temperature treatment. Part I. Monoglycerides [J]. *Starch/Stärke*, 2003, 55: 61—71.
- [19] Ribotta P D, León A E, Añón M C. Effect of freezing and frozen storage on the gelatinization and retrogradation of amylopectin in dough baked in a differential scanning calorimeter [J]. *Food Research International*, 2003, 36: 357—363.
- [20] Slade L, Levine H. Industrial Polysaccharides[M]. New York: Gordon and Breach, 1983.
- [21] 华泽钊, 李云飞, 刘宝林. 食品冷冻冷藏原理与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 104—109.
- [22] Baik M-Y, Kim K-J, Cheon K-C. Rectystallization kinetics and glass transition of rice starch gel system[J]. *Journal of the Agriculture and Food Chemistry*, 1997, 45: 4242—4248.

(责任编辑: 朱明)

简讯

江南大学杂志社成功举办第四届江苏省高校理科学报主编论坛

为了总结2007年第六届江苏省期刊质量评估分级和优秀期刊评选活动经验,迎接第二届中国高校精品·优秀·特色科技期刊评选和江苏期刊协会优秀主编、优秀编辑工作者评选,探讨高校科技期刊数字化相关问题,进一步提高期刊出版管理现代化水平和办刊内容质量,第四届江苏省高校理科学报主编论坛于2008年4月26—28日在无锡市江南大学举办。来自江苏省各高校科技期刊代表近60人参加了本次论坛。