

抑制剂对梨浊汁酶促褐变的控制研究

Research of inhibitors on enzymatic browning of cloudy pear juice

常大伟

魏送送

刘树兴

罗仓学

CHANG Da-wei WEI Song-song LIU Shu-xing LUO Cang-xue

(陕西科技大学食品与生物工程学院, 陕西 西安 710021)

(School of Food and Biological Engineering, Shaanxi University of
Science & Technology, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

摘要:酶促褐变是梨汁加工和贮藏过程中的主要技术难题之一,其严重影响梨汁的外观、风味等品质。文章以酥梨为试验材料,考察抗坏血酸(AA)、氯化钙、柠檬酸、 β -环糊精(β -CD)、乙二胺四乙酸(EDTA)5种抑制剂及其组合对梨浊汁酶促褐变的抑制作用。结果表明:在所选浓度范围内,单一抑制剂对多酚氧化酶相对酶活的抑制强弱顺序为:AA>氯化钙>柠檬酸> β -CD>EDTA,当AA、 β -CD、EDTA3种抑制剂结合使用时具有协同作用。通过正交试验设计得出最佳抑制剂组合为:0.10% AA+0.4% β -CD+0.08% EDTA,不仅能够较好地保存果汁中的酚类物质,而且可以使梨汁中多酚氧化酶活性降至未添加防褐变剂时的9.6%,获得色值较好的梨汁产品。

关键词:酥梨;梨浊汁;抑制剂;酶促褐变

Abstract: The enzymatic browning of pear juice was one of the major technical challenges during storage and processing. It reduced the value of pear juice such as the appearance, flavor and other quality. In this paper, crisp pear was selected as material. The inhibitory effects of enzymatic browning by browning inhibitors including ascorbic acid, calcium chloride, citric acid, β -cyclodextrin, EDTA and their combination were studied. The results showed that the order of the intensity of inhibition on the relative enzyme activity of polyphenol oxidase was ascorbic acid> calcium> citric acid> β -cyclodextrin> EDTA within the range of concentrations selected. And there was a synergistic effect among ascorbic acid, β -cyclodextrin and EDTA. The optical conditions by the orthogonal experimental design were that ascorbic acid concentration 0.10%, β -cyclodextrin concentration 0.4% and EDTA concentration 0.08%. It could not only protect polyphenol in juice, but also reduced the PPO activity to 9.6% com-

pared with that without incorporation of anti-browning agents. Under these conditions, the pear juice product with a high color value could be obtained.

Keywords: crisp pear; cloudy pear juice; inhibitor; enzymatic browning

酶促褐变是梨汁加工中重要的影响因素之一,是指在有氧条件下,多酚氧化酶(PPO)催化酚类物质形成醌及其聚合物的反应过程^[1]。PPO的辅基为铜离子,可采用添加化学抑制剂如AA^[2-3]、植酸^[4]、柠檬酸(CA)^{[3][5]19-22}、柠檬酸亚锡二钠^{[5]14-15}、L-半胱氨酸^[6]、4-己基间苯二酚(4-HR)^[7]、有机钙盐^[7]、植物提取物^[7]等用作PPO酶促反应的抑制剂。Sukhonthara等^[8]最新研究发现米糠的提取物可对多酚氧化酶和褐变起到有效的抑制作用。Liu Liang等^[9]研究发现L-半胱氨酸和谷胱甘肽可以有效抑制多酚氧化酶的活性。

研究^[10-11]发现使用两种及其以上抑制剂复合比单一抑制剂效果好。多种抑制剂结合使用,可避免由于单一抑制剂大量使用而造成的不良影响,例如CA的大量使用会使果汁偏酸而影响口感。采用复合抑制剂不仅能发挥单个抑制剂的作用,而且还能发挥相互之间的协同效应。E. Alvarez^[11]研究了 β -CD、4-己基间苯二酚(HR)和茉莉酮酸甲酯(MJ)3种物质对苹果PPO活性的抑制作用,从抑制常数得到抑制剂的强弱顺序为HR> β -CD>MJ;其中 β -CD和HR组合使用时具有协同效应,抑制效果比单一使用抑制作用强。赵光远等^[12]考察了半胱氨酸、AA、曲酸、氯化钠、氯化钙和偏重亚硫酸钠之间的协同作用,获得具有较好抗褐变能力的抑制剂组合为0.044%氯化钠+0.0125% AA。

与水果清汁相比,浊汁在加工过程中更容易褐变,而浊汁产品中梨浊汁的酶促褐变相对较为严重,影响梨浊汁产品的感官品质,使得其色值降低,达不到加工要求尤其是出口要求。食品工业中要求将加工过程中的不良反应降到最低程度,即需要通过有效的手段最大程度地抑制梨浊汁加工过程中的酶促褐变,添加抗褐变剂即为控制梨浊汁的有效手段

基金项目:陕西省科技厅项目(编号:2012JQ3013);陕西科技大学博士科研启动基金(编号:BJ11-13);陕西科技大学校内项目(编号:2012SB018)

作者简介:常大伟(1978—),男,陕西科技大学讲师,博士。

E-mail: cdw1860@126.com

收稿日期:2015-11-07

之一。目前果汁工业化生产中常用的褐变抑制剂是抗坏血酸,其对于浊汁类产品的抑制效果有限。本研究中首先采用短暂的微波处理对原料进行适当灭酶,再根据不同褐变抑制机理,分别选择了不同抑制剂并考察其对梨浊汁褐变的抑制效果,同时进一步探究不同抑制剂之间协同作用对梨浊汁褐变的控制作用,以改善加工过程中梨浊汁的护色效果,得到最佳的护色工艺。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

酥梨:产地陕西蒲城,购于陕西西安辛家庙果蔬批发市场;

电热恒温水浴锅:HH-S6 型,北京科伟永兴仪器有限公司;

微波炉:LG-WD900 型,LG 电子(天津)电器有限公司;

高速冷冻离心机:H-1850R 型,长沙湘仪离心仪器有限公司;

色差仪:CM-5 型,日本 Minoltra 公司;

料理机:JYLC012 型,山东九阳股份有限公司;

酸度计:Sartorius AC pH-10 型,北京赛多利斯仪器系统有限公司;

紫外可见分光光度计:UV-2600 型,尤尼柯上海仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 梨浊汁的制备 首先对梨进行预处理,去皮、核,切成小块(约 4 mm×4 mm×4 mm),然后经微波(功率为 720 W)处理 20 s,再浸入 3 mmol/L AA 浸泡 15 min。预处理后的梨经破碎榨汁、粗滤后制得浊汁。

1.2.2 单一褐变抑制剂对梨浊汁酶促褐变的影响 根据预试验的筛选结果,在预处理的梨中分别加入不同褐变抑制剂,包括 CA、AA、β-CD、氯化钙及 EDTA,同时根据预试验的结果,选取各抑制剂的浓度(均为质量浓度)范围为:CA 浓度 0.1%,0.2%,0.3%,0.4%,0.5%;AA 浓度 0.02%,0.04%,0.06%,0.08%,0.10%,0.12%,0.14%,0.16%,0.18%,0.20%;β-CD 浓度 0.1%,0.2%,0.3%,0.4%,0.5%,1.0%;氯化钙浓度 0.02%,0.04%,0.06%,0.08%,0.10%,0.15%,0.20%;EDTA 浓度 0.01%,0.02%,0.03%,0.04%,0.05%,0.06%,0.10%。然后打浆、制汁,再提取梨浊汁中的 PPO 并测定其活性。对照为加入 0.2%(m/m)亚硫酸氢钠制得的梨浊汁。

1.2.3 复合褐变抑制剂对梨浊汁酶促褐变的影响 研究不同种类的复合褐变抑制剂之间的作用,寻找最佳防褐变抑制剂的复配剂,试验方法同 1.2.2。

1.2.4 PPO 提取及活性测定 参考文献[13]。

1.2.5 还原型抗坏血酸测定 采用 2,6-二氯靛酚法[14]。

1.2.6 总酚含量测定 参照文献[15]。

2 结果与讨论

2.1 单一褐变剂对梨浊汁褐变的抑制作用

2.1.1 AA 的抑制作用 由图 1 可知,色差随着 AA 含量的

增加呈下降趋势。说明 AA 对酶促褐变的抑制作用具有浓度依赖性,低浓度的 AA 被醌类物质氧化消耗后酶促反应会继续进行,AA 的氧化分解会生成有色物质从而使色差上升,而高浓度的 AA 可以有效抑制酶促褐变。PPO 活性随 AA 含量增加快速降低,可能是一方面,随 AA 含量增加 PPO 活性快速降低,其可能的原因是 AA 与 PPO 的辅基铜离子发生螯合,从而降低 PPO 活性;另一方面,AA 作为还原剂与邻苯二酚氧化生成的中间产物邻二醌作用生成了稳定的无色化合物邻二酸和脱氢 AA,阻止了终产物黑色素的生成[16],使色差降低。因此 AA 是一种可以有效控制梨浊汁酶促褐变的褐变抑制剂。

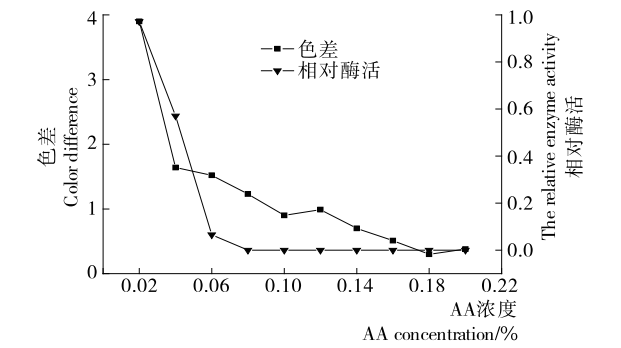


图 1 AA 对梨浊汁色差和 PPO 活性的影响
Figure 1 Effects of added AA on color difference and PPO activity of pear juice (n=3)

2.1.2 CA 的抑制作用 由图 2 可知,随 CA 含量的升高,色差和 PPO 活性均下降。pH 值对 PPO 活性的影响比较明显,随着 pH 的下降,可使 PPO 中的辅基铜离子解离出来,使 PPO 失活,另一方面当 pH 降低到一定程度也可以使蛋白质变性而降低 PPO 的活性。由上可知 CA 是较好的酶促褐变抑制剂,但是当添加 0.50% CA 时,pH 会降至 2.5,使得梨浊汁因过酸而不宜食用。低浓度的 CA 对褐变的抑制作用较小,因此对于梨浊汁来说 CA 不是抑制剂的好选择。

2.1.3 氯化钙的抑制作用 由图 3 可知,随氯化钙含量增加,梨浊汁中 PPO 活性降低,当氯化钙浓度为 0.2%时酶活降至 33.86%,氯化钙对 PPO 活性的抑制作用主要是因为钙离子与 PPO 结合,降低 PPO 的活化能,从而抑制酶促褐变。色差随氯化钙含量增加而降低,在 0~0.2%浓度范围内,对

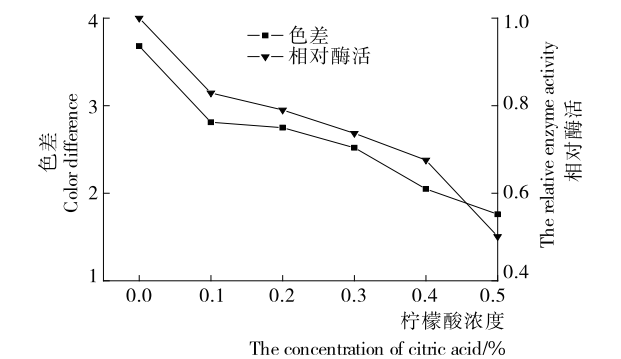


图 2 CA 对梨浊汁色差和 PPO 活性的影响
Figure 2 Effects of citric acid on color difference and PPO activity (n=3)

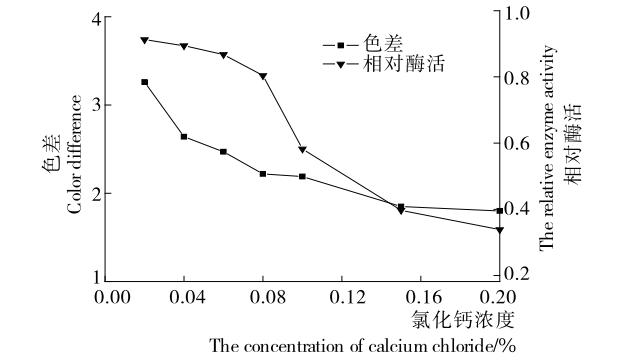


图 3 氯化钙对梨浊汁色差和 PPO 活性的影响

Figure 3 Effects of calcium chloride on color difference and PPO activity ($n=3$)

酶促褐变的抑制作用随氯化钙浓度的升高而增强。与 AA、CA 相比氯化钙对于酥梨酶促褐变的抑制效果不明显,因此单纯氯化钙不适用于抑制梨浊汁中的酶促褐变。

2.1.4 EDTA 的抑制作用 由图 4 可知,随 EDTA 含量增加 PPO 活性呈现先直线下降,后缓慢下降的趋势。当 EDTA 浓度从 0.0% 提高至 0.03% 时,酶活从 100% 降至 57.43%;当 EDTA 浓度从 0.04% 上升至 0.1% 时,酶活仅从 57.09% 降低到 56.71%。表明 EDTA 对酶促褐变的抑制作用表现为非浓度依赖性,其对酶促褐变的抑制作用,是由于 EDTA 作为一种金属离子螯合剂与 PPO 络合实现的。色差随 EDTA 添加量的增加逐渐降低。总体来说 EDTA 对梨浊汁中的酶促褐变有较好的抑制作用。

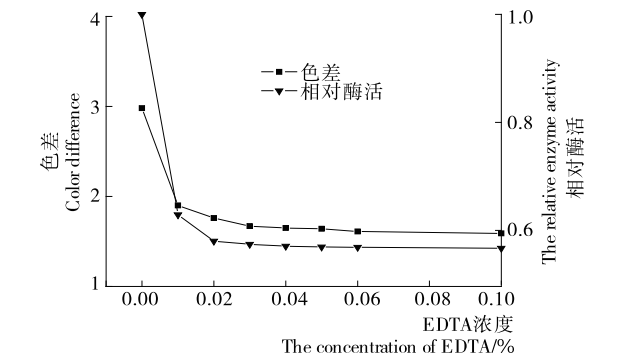


图 4 EDTA 对梨浊汁色差和 PPO 活性的影响

Figure 4 Effects of EDTA on color difference and PPO activity ($n=3$)

2.1.5 β -CD 的抑制作用 由图 5 可知,随 β -CD 浓度的增加 PPO 活性显著降低,与未添加 β -CD 的空白相比,酶活降低了 27.77%。 β -CD 对酶促褐变的抑制作用是通过防止氧化邻-苯醌及其以后的聚合作用,阻止黑色素类物质的生成。色差也随 β -CD 浓度增加而降低。E. Alvarez 等^[11]研究发现 β -CD 可与多酚类物质形成复合物,从而降低了 PPO 底物浓度对酶促褐变的抑制作用。

综上,在所选浓度范围内,根据相对酶活和色差值,单一抑制剂对多酚氧化酶相对酶活的抑制强弱顺序为:AA>氯化钙>CA> β -CD>EDTA,由于加入氯化钙后梨汁有一定苦味,所以选择 AA、CA、 β -CD、EDTA 4 种抑制剂,进一步研

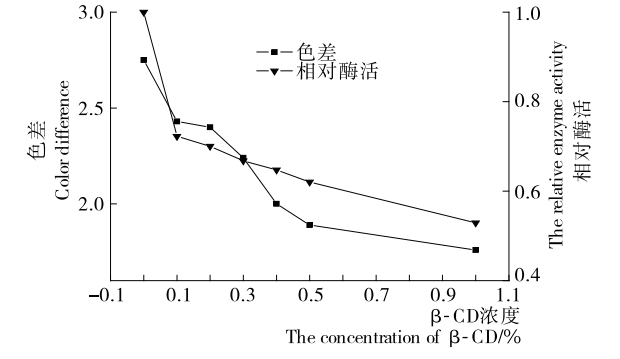


图 5 β -CD 对梨浊汁色差和 PPO 活性的影响

Figure 5 Effects of β -CD on color difference and PPO activity ($n=3$)

究其复合物对梨浊汁褐变的作用。

2.2 复合抑制剂对梨浊汁褐变的抑制作用

依据 AA、CA、 β -CD、EDTA 4 种抑制剂的浓度与相对酶活及色差值关系曲线中拐点处的浓度值,即相对酶活及色差值降低最快处所对应的浓度,选择各抑制剂浓度见表 1。

表 1 抑制剂的种类和浓度				
Table 1 The type and concentration of the inhibitors				
抑制剂种类	A AA	B CA	C β -CD	D EDTA
抑制剂浓度 / %	0.08	0.30	0.40	0.06

2.2.1 复合抑制剂的组合方式 由表 2 可知,复合抑制剂对酶促褐变的抑制效果比单一抑制剂的显著。综合考虑,9 号试验即 A+C+D 的防褐变效果最佳,因此选择 AA、 β -CD、EDTA 做正交试验设计。

2.2.2 复合抑制剂的配制

(1) 正交试验因素水平:选择 AA、 β -CD、EDTA,采用 $L_9(3^4)$ 正交试验设计进行试验,因素水平见表 3。

表 2 抑制剂的组合方式及对酶促褐变的影响				
Table 2 The combinations of inhibitors and their effects on enzymatic browning ($n=3$)				
试验号	组合方式	总酚含量 / ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	色差 ΔE	相对酶活

试验号	组合方式	总酚含量 / ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	色差 ΔE	相对酶活
对照	0	0.216	3.98	1.000
1	A+B	0.247	1.72	0.692
2	A+C	0.291	2.30	0.522
3	A+D	0.278	3.23	0.454
4	B+C	0.252	2.04	0.575
5	B+D	0.261	2.92	0.652
6	C+D	0.263	1.78	0.448
7	A+B+C	0.316	1.57	0.486
8	A+B+D	0.339	2.41	0.465
9	A+C+D	0.422	1.24	0.310
10	B+C+D	0.273	2.05	0.616
11	A+B+C+D	0.380	1.68	0.382
12	对照 0.2%亚硫酸氢钠	0.528	0.00	0.000

表 3 L₉(3⁴) 正交因素水平表

Table 3 L ₉ (3 ⁴) Factors and levels of orthogonal experiment				%
水平	A AA 浓度	B β-CD 浓度	C EDTA 浓度	
1	0.06	0.30	0.04	
2	0.08	0.40	0.06	
3	0.10	0.50	0.08	

(2) 正交试验设计:按照表 3 因素水平表做正交试验设计,结果见表 4。

由表 4 可知,对总酚含量影响的主次顺序为 A>C>B,其最佳组合为 A₃B₃C₃;对色差影响的主次顺序为 A>B>C,其最佳组合为 A₃B₃C₃;对 PPO 活性影响的主次顺序为 A>C>B,最佳组合为 A₃B₃C₁。

以空白列作为误差项对其它因素进行显著性检验。由表 5~7 可知,AA 浓度对总酚含量、色差和 PPO 活性均有显

表 4 正交试验结果

Table 4 Results of orthogonal experiment (n=3)

试验号	A	B	C	D(空列)	总酚含量/(g·L ⁻¹)	色差 ΔE	相对酶活
1	1	1	1	1	0.292±0.002	1.81±0.048	0.236±0.009
2	1	2	2	2	0.302±0.009	1.75±0.021	0.241±0.004
3	1	3	3	3	0.353±0.005	1.37±0.023	0.244±0.005
4	2	1	2	3	0.287±0.004	1.82±0.056	0.238±0.006
5	2	2	3	1	0.273±0.003	2.11±0.032	0.433±0.004
6	2	3	1	2	0.278±0.003	1.93±0.046	0.208±0.008
7	3	1	3	2	0.402±0.010	1.15±0.085	0.191±0.005
8	3	2	1	3	0.382±0.002	1.41±0.082	0.066±0.002
9	3	3	2	1	0.373±0.009	1.32±0.028	0.172±0.002
总酚含量	k ₁	0.316	0.327	0.317	0.313		
	k ₂	0.279	0.319	0.321	0.327		
	k ₃	0.386	0.335	0.343	0.341		
	R	0.107	0.016	0.026	0.028		
色差	k ₁	1.643	1.593	1.717	1.747		
	k ₂	1.953	1.757	1.630	1.610		
	k ₃	1.293	1.540	1.543	1.533		
	R	0.660	0.217	0.174	0.214		
相对酶活	k ₁	0.240	0.221	0.170	0.280		
	k ₂	0.293	0.247	0.217	0.213		
	k ₃	0.143	0.208	0.289	0.183		
	R	0.150	0.039	0.119	0.097		

著性影响,故将其作为优先考虑的因素;EDTA 对 PPO 活性有显著影响,而对总酚含量和色差影响不显著;β-CD 对总酚含量、色差和 PPO 活性影响均不显著。

综上,根据色差和 PPO 酶活,结合极差分析和显著性检验分析,AA、β-CD 和 EDTA 3 种抑制剂的最佳组合为 A₃B₃C₁,即 0.10% AA,0.4% β-CD,0.08% EDTA。

表 5 总酚含量的方差分析

Table 5 Variance analysis of the total polyphenol content					
因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
A	0.018	2	18.000	9.000	*
B	0.000	2	0.000	9.000	
C	0.001	2	1.000	9.000	
误差	0.000	2			

表 6 色差的方差分析

Table 6 Variance analysis of the color difference					
因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
A	0.654	2	9.343	9.000	*
B	0.076	2	1.086	9.000	
C	0.045	2	0.643	9.000	
误差	0.070	2			

表 7 相对酶活的方差分析

Table 7 Variance analysis of the PPO activity					
因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
A	0.035	2	17.500	9.000	*
B	0.002	2	1.000	9.000	
C	0.022	2	11.000	9.000	*
误差	0.000	2			

(3) 验证实验:对由正交试验得出的最佳条件及表中最佳结果的组合 A₃B₁C₃ 进行验证性实验,结果见表 8。在 A₃B₃C₁ 条件下总酚含量为 0.435 g/L,色差为 1.18,PPO 活性为 0.096,试验重现性较好,说明上述最佳组合条件可行,能用于梨浊汁生产中护色。

表 8 验证实验结果

Table 8 Results of verification experiment

实验	总酚含量/(g·L ⁻¹)	色差 ΔE	相对酶活
空白	0.191	2.98	1.000
A ₃ B ₁ C ₃	0.396	1.27	0.237
A ₃ B ₃ C ₁	0.435	1.18	0.096
对照	0.521	0.00	0.000

3 结论

本研究结果表明,AA、氯化钙、CA、β-CD、EDTA 作为单一抑制剂对多酚氧化酶均具有抑制效果,且对于 PPO 相对酶活的抑制强弱顺序为:AA>氯化钙>CA>β-CD>EDTA,复合抑制剂(AA、β-CD、EDTA)之间的协同效应使其对酶促褐变的抑制效果优于单一抑制剂,因此在目前工业生产中常用的抑制剂 AA 的基础上,复配其他抑制剂会增强对梨浊汁酶促褐变的抑制效果,一个能够较好抑制梨浊汁褐变的抑制剂组合为:0.10% AA+0.4% β-CD+0.08% EDTA。该组合的复合抑制剂不仅能够较好地保存梨汁中的酚类物质,还可使梨汁中 PPO 活性降至未添加抑制剂的 9.6%,获得营养成分损失较小且色值较好的梨浊汁产品,使其满足质量标准特别是出口质量标准,拓宽梨浊汁产品的应用范围并提高其出口率,创造更大的经济价值。同时,该复合抑制剂组合对其他果蔬加工尤其是果汁的加工中护色关键工艺的控制具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 阙建全. 食品化学[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2002: 251.
[2] Komthong P, Igura N, Shimoda M. Effect of ascorbic acid on

the odours of cloudy apple juice[J]. Food Chemistry, 2007, 100 (4): 1 342-1 349.
[3] 程双, 胡文忠, 马跃, 等. 鲜切甘薯酶促褐变调控的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(6): 158-160.
[4] 赵玉生. 植酸对菠菜汁苹果汁的护色实验研究[J]. 食品研究与开发, 2000, 21(3): 19-21.
[5] 金定樑. 柠檬酸亚锡二钠对果蔬及其制品护色的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
[6] 邱龙新, 黄浩, 陈清西. 半胱氨酸对马铃薯多酚氧化酶的抑制作用[J]. 食品科学, 2006, 27(4): 37-40.
[7] 程双, 胡文忠, 马跃, 等. 鲜切果蔬酶促褐变机理及控制研究进展[J]. 食品与机械, 2009, 25(4): 173-176.
[8] Sukhontha S, Kunwadee K, Chockchai T. Inhibitory effect of rice bran extracts and its phenolic compounds on polyphenol oxidase activity and browning in potato and apple puree[J]. Food Chemistry, 2015, 190: 922-927.
[9] Liu Liang, Cao Shao-qian, Yang Hua, et al. Pectin plays an important role on the kinetics properties of polyphenol oxidase from honeydew peach[J]. Food Chemistry, 2015, 168: 14-20.
[10] 宋莲军, 杨月, 唐贵芳. 复合抑制剂对苹果汁防褐变效果的影响[J]. 河南农业大学学报, 2010, 44(5): 585-590.
[11] Alvarez-Parrilla E, De La Rosa L A, Rodrigo-Garcia J, et al. Dual effect of β-cyclodextrin (β-CD) on the inhibition of apple polyphenol oxidase by 4-hexylresorcinol (HR) and methyl jasmonate (MJ) [J]. Food Chemistry, 2007, 101(4): 1 346-1 356.
[12] 赵光远, 王璋, 许时婴. 混浊苹果汁加工过程中的酶促褐变及其防止的研究[J]. 食品工业科技, 2003, 24(10): 57-61.
[13] Mishra B B, Gautam S, Sharma A. Purification and characterisation of polyphenol oxidase (PPO) from eggplant (Solanum melongena) [J]. Food Chemistry, 2012, 134(4): 1 855-1 861.
[14] 宁正祥. 食品成分分析手册[M]. 北京:中国轻工业出版社, 1997: 306.
[15] 中华人民共和国农业部. NY/T 1600—2008 水果、蔬菜及其制品中单宁含量的测定[S]. 北京:中国农业出版社, 2008.
[16] 李健, 徐艳艳, 黄美, 等. 鸭梨果实多酚氧化酶酶学特性[J]. 食品科学, 2013, 34(15): 154-157.

(上接第 100 页)

(4) 从操作安全性考虑,该系统设定了急停和再启动,当打印系统在执行过程中出现偏离设计程序的情况时可以迅速执行紧急停车,并同时报警提示,操作人员可以迅速做出处理。如果在打印过程中人为地需要紧急停车,则可以执行紧急制动按钮,实现机械操作,当需要再次启动时可以按启动按钮继续工作。

(5) 当执行程序结束后,触摸屏会显示打印完成的指示信号,并以 1 Hz 闪烁灯提示,然后操作人员可以关断电源,待加热平台、喷嘴自然冷却后,取下打印物品,自此打印完成。

5 结束语

根据奶油特有的性质,3D 打印机在机械结构设计上采取了 PLC 加运动控制卡的模式,解决了立体打印的难题,通过对温控的针对性要求,实现连续化、细腻打印的可能。该

机结合微机技术,采用伺服电动机和步进电动机,实现自动控制,并采取二次插补算法大大提高了系统运作的实时性和可靠性。但复杂图案的设计和在线及时编程还需要进一步加强和改进。

参考文献

[1] 李晓燕, 张署. 三维打印快速成形及其实验研究[J]. 电加工与模具, 2005(5): 22-25.
[2] 李萍红, 杨柳春. 工控组态技术及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2013: 63-65.
[3] 刘洪涛. PLC 应用开发从基础到实践[M]. 北京:电子工业出版社, 2007: 13-14.
[4] 徐国林. PLC 控制技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2007: 25-26.
[5] 戴宁, 廖文和, 陈春美. STL 数据快速拓扑重建关键算法[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2005, 17(11): 2 447-2 452.